

Riga Nordic University



Sumy State Pedagogical University named after A. S. Makarenko

NATURAL SCIENCES AND EDUCATION IN THE CONTEXT OF SUSTAINABLE DEVELOPMENT: BIOLOGICAL, GEOGRAPHICAL, CHEMICAL, AND ENVIRONMENTAL DIMENSIONS

Scientific monograph

Volume 2



2026

Recommended for printing and distribution via Internet
by the Academic Council of Baltic Research Institute
of Transformation Economic Area Problems according
to the Minutes № 9 dated 30.09.2026

EDITORS:

Djakons Romans – Dr.sc.ing., Professor, Academician, Chairman of the Board of Riga Nordic University;
Babenko Olena Mykhailivna – Candidate of Pedagogical Sciences, Associate Professor, Head of the Department of Human Biology, Chemistry, and Methods of Teaching Biology at Sumy State Pedagogical University named after A. S. Makarenko;
Kornus Anatolii Oleksandrovych – Candidate of Geographic Sciences, Associate Professor, Deputy Dean for Research of the Faculty of Natural Sciences and Geography, Associate Professor at the Department of General and Regional Geography at Sumy State Pedagogical University named after A. S. Makarenko;
Lytvynenko Yuliia Ivanivna – Candidate of Biological Sciences, Associate Professor, Head of the Department of Biology and Methods of Teaching Biology at Sumy State Pedagogical University named after A. S. Makarenko.

REVIEWERS:

Danylchenko Olena Serhiivna – Candidate of Geographical Sciences, Associate Professor, Associate Professor at the Department of General and Regional Geography, Sumy State Pedagogical University named after A. S. Makarenko;
Vakal Anatolii Petrovych – Candidate of Biological Sciences, Associate Professor, Associate Professor at the Department of Biology and Biology Teaching Methods, Sumy State Pedagogical University named after A. S. Makarenko;
Vakal Yuliia Serhiivna – Doctor of Philosophy, Associate Professor at the Department of Human Biology, Chemistry and Chemistry Teaching Methods, Sumy State Pedagogical University named after A. S. Makarenko.

Natural Sciences and Education in the Context of Sustainable Development: Biological, Geographical, Chemical, and Environmental Dimensions: Scientific monograph. Riga, Latvia : "Baltija Publishing", 2026. Volume 2. 604 p.

© Riga Nordic University, 2026
© Sumy State Pedagogical University named after A. S. Makarenko, 2026

ISBN 978-9934-26-714-7

CONTENTS

INNOVATIVE ASPECTS OF THEORETICAL AND EXPERIMENTAL CHEMISTRY

Chapter 22

The historical development of photoredox catalysis (Bahirov E., Lampeka R.) . . . **2**

1. Origins of photoredox catalysis (1888–1977) . . . 2
2. Establishment of photoredox catalysis (1978–2007) . . . 10
3. Modern development of photoredox catalysis (2008–2026) . . . 16
4. Development of mesityl-acridinium photosensitizers in photocatalysis . . . 26
5. Synthesis of N-alkyl and N-aryl acridinium salts . . . 29
6. Potential application of the new acridinium photocatalyst . . . 31

Chapter 23

Diffusion-ordered NMR spectroscopy (DOSY) in the analysis of multicomponent mixtures (Hreben M., Lampeka R.) . . . **45**

1. Practical applications of DOSY in the analysis of complex systems . . . 47
2. Environmental science and contaminant dynamics . . . 51
3. Multidimensional 3D-DOSY spectroscopy . . . 52
4. Experimental part . . . 54

Chapter 24

Chemical foundations of Ukraine's sustainable development in the context of green energy and industrial decarbonization (Kochubei O.) . . . **62**

1. Chemical foundations of Ukraine's green energy . . . 63
2. Chemical technologies for the decarbonization of Ukraine's industry . . . 73

Chapter 25

Performance properties and biodegradation of bioplastic film materials (Krykhovets O.) . . . **85**

1. Materials and methods . . . 90
2. Results and discussion . . . 92

Chapter 26

Computational continuum-methods for studying chemical problems in solution (after J. Tomasi) (Tokar A.) . . . **106**

1. Computational methods for describing liquids. Fundamentals of continuum solvation methods and components of solvation energy . . . 108
2. Extension of the model to study chemical processes in solution. Interpretation of the internal reaction mechanism . . . 115

Chapter 27
Environmentally benign strategies for the synthesis and functionalization of imidazolidine-based systems (Kharchenko Yu.) . . . **127**
1. Sustainable synthetic strategies for imidazolidine-based systems . . . 128
2. Structure–reactivity relationships and green functionalization . . . 141
3. Applications and industrial feasibility . . . 144

PHYSICAL GEOGRAPHY, SOCIO-GEOGRAPHICAL TRANSFORMATIONS OF TERRITORIES, AND SPATIAL MODELLING

Chapter 28
Ecological and geographical foundations for the sustainable development of national nature parks in the Ukrainian Carpathians (Basiuk T., Romaniv A.) . . . **153**
1. Formation and current state of the national nature park network in the Ukrainian Carpathians . . . 154
2. Ecological risks and anthropogenic transformation of mountain landscapes . . . 158
3. Optimization of spatial structure and innovative management of protected areas . . . 164

Chapter 29
Political and geographical dimensions of Norway's sustainable development under the transformation of resource and environmental policy (Braslavska O.) . . . **173**
1. Geographical, institutional, and resource-economic dimensions of Norway's sustainable development . . . 174
2. Environmental policy, territorial conflicts, and prospects for Norway's sustainable development . . . 180

Chapter 30
Geographical patterns of post-war reconstruction in Germany: urban planning decisions (Gukalova I.) . . . **188**
1. Spatial destruction and the preconditions for recovery . . . 188
2. The case of the Federal Republic of Germany . . . 194
3. The case of the German Democratic Republic . . . 197

Chapter 31
Mining waste management in Lviv region: problems of accumulation and efficiency of use (Ivanov Ye., Voitkiv P., Kornus A.) **206**
1. Environmental problems associated with the accumulation and using mining waste 209
2. Volumes of mining waste accumulation 212
3. Efficiency of mining waste use 220

Chapter 32
The subjective dimension of financial sustainability and quality of life in the communities of Chernivtsi Oblast (survey results) (Kurysh T.) **229**
1. Methodology for conducting a subjective study of financial sustainability and quality of life of the region's population 231
2. Empirical analysis of the financial sustainability and subjective assessments of quality of life of the population of Chernivtsi Oblast 234

Chapter 33
Public reporting in urban water supply: a case study of district centres in Poltava region (Lutsoviat A.) **255**
1. Public information in the system of sustainable urban water governance 256
2. Data, criteria and methodology of the comparative documentary audit 260
3. Audit results and comparison of data aggregation methods 265

Chapter 34
Overlay analysis of planform channel changes of the Prut River in the foothill reach and their practical significance (Pasichnyk M., Hryhoriichuk V., Martynova Khavruniak A.) **274**
1. Physico-geographical conditions of the Prut River basin and theoretical foundations for the study of channel processes 276
2. Software and cartographic-information support of the research 307
3. Channel planform changes of the Prut River within the study reach 333
4. Water intake structures under conditions of channel planform changes of the Prut River 350

Chapter 35
Spatial and temporal distribution of ice-frost deposits of the categories DP (dangerous phenomena) and SHP (spontaneous phenomena) in Ukraine during 2021–2025 (Pyasetska S.) **363**
1. Ice deposits of the categories DP (dangerous phenomena) and SHP (spontaneous phenomena) 367
2. Wet snow deposits of the categories DP (dangerous phenomena) and SHP (spontaneous phenomena) 373
3. Cases of complex deposits of the categories DP (dangerous phenomena) and SHP (spontaneous phenomena) 379

MODERNISATION OF NATURAL SCIENCE EDUCATION: METHODOLOGICAL INNOVATIONS AND PRACTICAL EXPERIENCE

Chapter 36
The use of artificial intelligence in the practical training programme for the educational component "Educational Fieldwork in Natural History and Local History" (Budnik S.) **391**
1. Academic approaches to the use of artificial intelligence in modern education 392
2. Artificial intelligence as a means of modernising the educational component "Educational Fieldwork in Natural History and Local History" . 394
3. Methodology for organising educational fieldwork in natural sciences and local history using artificial intelligence technologies 399

Chapter 37
Ecocentrism and valeological culture in the modern educational space (Buzenko I., Zelenenka I., Parchevska A.) **409**
1. Peculiarities of the formation of the eco-educational terminological system and eco-culture of education seekers 412
2. Ecovaleological competencies and their relevance: educational ecocentrism and global ecodiscourse 415
3. The problem of algorithmization of eco-valueological competencies . . 418

Chapter 38
Mind mapping as a tool for developing students' cognitive strategies in biology and chemistry classes (Hirya O.) **427**
1. Mind mapping and cognitive learning strategies for students 428
2. The impact of mind mapping on the development of students' individual cognitive strategies in biology and chemistry classes 436

Chapter 39
Research on the features of teaching natural sciences in distance learning (Diuzhykova T., Chetvertak T., Barus M.) **448**
1. Theoretical basis of teaching natural disciplines 449
2. Features of teaching natural disciplines in distance learning 452
3. Practical aspects and recommendations 454

Chapter 40
Results of studies on hydrogeological and geodynamic conditions in ecologically hazardous regions and their application in the study of natural sciences (Ihnatyshyn V.) **460**
1. Some features of basic geography education at the present stage and prospects for its development 461
2. Analysis of publications addressing issues related to geodynamic, seismological, and geographical processes in the region 462
3. Study of hydrological conditions in the central part of the Transcarpathian Interior Trough for the year 2024. Variations in precipitation 468
4. Variations in precipitation in the Transcarpathian Interior Trough and current horizontal movements of the region's crust for the year 2024 (based on the results of geophysical monitoring at the region's operational geophysical stations) 475

Chapter 41
Organizational and pedagogical conditions for creating a healthy environment in preschool education (Kalichak Yu.) **487**
1. Components of the category "health-preserving environment" 488
2. Prerequisites for creating a health-preserving environment in preschool institutions 492
3. Practical recommendations for teachers 496

Chapter 42
Environmental and project-based activities in the school geography curriculum: theoretical and methodological foundations and digital tools for implementation (Nepsha O., Hryshko S., Levada O.) **511**
1. Theoretical and methodological foundations for organising environmental project work within the school geography curriculum 512
2. Methodological support for environmental project-based learning in the school geography curriculum using digital technologies 520

Chapter 43
Soil-ecological research in the training of geography specialists as a basis for sustainable territorial development (a case study of the Transcarpathian Lowland) (Saliuk M., Mykyta M.) 534
1. Soil cover of the Transcarpathian Lowland: genetic-geographical and ecological-functional characteristics 536
2. Transformation of land-use approaches and organization of soil cover monitoring in the region 541
3. Practice-oriented training of future geography specialists based on soil-ecological monitoring 547

Chapter 44
Professional language training of natural sciences students: ESP and English-medium instruction models (Semak O., Semak U.) 560
1. General theoretical foundations of teaching a foreign language for professional purposes to natural sciences students 563
2. Two methodological models for delivering professional language training 565
3. Empirical grounding and the Ukrainian institutional context 571

Chapter 45
Nature subject English tasks for future agronomists, ecologists, land managers, power engineers and coaches (Yakushko K.) 577
1. Nature subject English tasks for future agronomists and ecologists 578
2. Nature subject English tasks for future land managers and power engineers 580
3. Nature subject English tasks for future sport instructors 586

02
SECTION

INNOVATIVE ASPECTS OF THEORETICAL AND EXPERIMENTAL CHEMISTRY

CHAPTER 22

THE HISTORICAL DEVELOPMENT OF PHOTOREDOX CATALYSIS

Bahirov Elvir, Lampeka Rostyslav
DOI https://doi.org/10.30525/978-9934-26-714-7-22

INTRODUCTION

The history of photocatalysis is both interesting and, in some respects, complex. Unlike modern researchers, who design and synthesize photocatalysts and photosensitizers for particular model reactions, the early investigators had only limited knowledge of photocatalytic processes and could not rely on previous experience. Their studies were mainly of a fundamental nature, whereas practical applications remained limited. Under such conditions, the behavior of newly synthesized compounds could not be predicted. In most cases, the only way to evaluate a new molecule was to prepare it and examine its properties experimentally. Since only a small number of compounds, and sometimes only a single compound, were available, the first practical results were obtained almost entirely by experiment rather than by rational design.

1. Origins of Photoredox Catalysis (1888–1977)



Fritz Blau

The first photosensitizer that comes to the mind of most chemists is undoubtedly tris(2,2′-bipyridine)ruthenium(II), $[Ru(bpy)_3]^{2+}$. The history of this complex, however, began much earlier, in the nineteenth century. In 1888, the Austrian chemist Fritz Blau (1865–1929), who had received his doctoral degree at the age of twenty-one for studies on nicotine chemistry, reported the first synthesis of 2,2′-bipyridine[1] (Figure 1a). Although attempts to prepare bipyridines had been made before Blau's work, they invariably afforded mixtures of positional isomers[2]. During the same period, Weidel, who also studied the synthesis of bipyridines, probably obtained small amounts of 2,2′-bipyridine. However, it was most likely identified as the bipyridine previously reported by Anderson from the reaction of pyridine with metallic sodium. It is now known that this reaction affords predominantly 4,4′-bipyridine[3], while substituted pyridines also give mainly 4,4′-bipyridine derivatives[4].

Blau subsequently prepared and described a series of stable chelate complexes of iron. Among them were $[Fe(bpy)_3]^{2+}$ together with several cobalt(II) and copper(II) complexes containing 2,2′-bipyridine and 1,10-phenanthroline[5]. His oxidation experiments with $[Fe(bpy)_3]^{2+}$ showed that the conversion of Fe^{2+} into Fe^{3+} required a stoichiometric amount of potassium permanganate. This result demonstrated that oxidation occurred at the metal center rather than at the organic ligand. At that time, this observation provided important experimental support for Werner's coordination theory, which was being developed together with the first studies of coordination compounds.

Blau also described the resulting ferric complex as a highly reactive blue compound. Upon exposure to light, the blue solution rapidly turned red because of the reduction of iron from the +3 to the +2 oxidation state. The ferric complex was also able to oxidize metallic mercury and silver, both metals being converted into their ionic forms while the solution became red. Blau further observed that the addition of alkali caused an immediate color change from blue to red, accompanied by the evolution of ozone. He also noted that neither 3,3′- nor 4,4′-bipyridine formed analogous iron complexes, indicating that these properties were characteristic of 2,2′-bipyridine.

---

[1] Fritz Blau. Die Destillation pyridinmonocarbonsaurer Salze. *Berichte der Deutschen Chemischen Gesellschaft.* 1888. Vol. 21. P. 1077–1078. DOI: 10.1002/cber.188802101201

[2] Weidel H., Russo M. Studien über das Pyridin. *Monatshefte für Chemie*. 1882. Vol. 3. P. 850–885. DOI: 10.1007/BF01516855

[3] Anderson T. Ueber die Producte der trockenen Destillation thierischer Materien. *Annalen der Chemie und Pharmacie*. 1870. Vol. 154. P. 270–286. DOI: 10.1002/jlac.18701540303
1870;154:270–286. DOI: 10.1002/jlac.18701540303

[4] Heuser A., Stoehr C. Ueber methylirte Dipyridyle; II. Abhandlung. *Journal für Praktische Chemie*. 1891. Vol. 44. P. 404–410. DOI: 10.1002/prac.18910440133

[5] Blau F. Über neue organische Metallverbindungen. *Monatshefte für Chemie*. 1898. Vol. 19. P. 647–689. DOI: 10.1007/BF01517438

Blau was also among the first investigators to study heterogeneous photochemical processes directly under the microscope. In particular, he observed the phenomenon now known as hydratochromism for tris(bipyridine)iron(III) chloroplatinate. Within a few minutes, red serrated outgrowths appeared on the surface of the original green crystals and gradually propagated along the entire crystal. Blau further demonstrated that this process was completely reversible in the solid state. Treatment of the red crystals with chlorine water immediately regenerated the original green Fe^{3+} complex without dissolution of the solid. Thus, the work published in 1898 was not limited to the preparation of the first coordination compounds but also provided one of the earliest demonstrations of a reversible light-induced redox transformation in the solid state (Figure 1b).

The life and scientific activity of Fritz Blau were later described by his friend and colleague Marcello Pirani. Pirani is best known for the invention of the Pirani vacuum gauge in 1906, an instrument that is still widely used in chemical laboratories, vacuum lines, and rotary evaporators for the measurement of low pressures. It is of interest that, at the beginning of the twentieth century, Blau left academic research and entered industry. He became the head of the newly established research department of Osram (named after the elements osmium Os and tungsten W). Pirani was responsible for studies on gas discharge and electric lamps, whereas Blau directed the chemical research, patent activities, and the metallurgy of tungsten[6].

A detailed account of the chemistry and functionalization of bipyridines has recently been presented in the review by Catherine E. Housecroft (2019)[7].

Almost fifty years later, in 1936, Francis Burstall, working at the Chemical Research Laboratory in Teddington (England), prepared the same complex that is now regarded as the classical photosensitizer, $[Ru(bpy)_3]^{2+}$. At that time, however, Burstall was not interested in its photochemical properties. His research was devoted primarily to problems of stereochemistry. According to Werner's coordination theory, the octahedral complex should exist as two optical isomers. Burstall succeeded in resolving the racemic mixture into the stable left- and right-handed enantiomers.

The replacement of iron by ruthenium, a heavier element of the same group, was later found to produce a profound change in the properties of the complex. In particular, efficient metal-to-ligand charge transfer (MLCT) became possible. Owing to the strong spin–orbit coupling of ruthenium, the complex possesses unusually long-lived triplet excited states. These properties subsequently

[6] Pirani M. Fritz Blau. *Naturwissenschaften*. 1930. Vol. 18. P. 97–101. DOI: 10.1007/BF01493015

[7] Constable E. C., Housecroft C. E. The Early Years of 2,2'-Bipyridine–A Ligand in Its Own Lifetime. *Molecules*. 2019. Vol. 24, No. 21. Art. 3951. DOI: 10.3390/molecules24213951

established $[Ru(bpy)_3]^{2+}$ as one of the most important reference compounds in both photoredox catalysis and luminescence studies[8]. Burstall also synthesized the corresponding ruthenium terpyridyl complex, which later became another reference compound in coordination photochemistry[9].

After the preparation of these complexes in pure form, they remained essentially without practical application for more than twenty years. The breakthrough came in 1959, when Paris and Brandt first observed that $[Ru(bpy)_3]^{2+}$ exhibits an unusually intense luminescence with an exceptionally long excited-state lifetime in solution at room temperature. This finding was remarkable because no comparable behavior had previously been reported for coordination compounds. They correctly suggested that the emission originated from a metal-to-ligand charge-transfer process and described it as fluorescence. However, at that time the theoretical basis of the excited-state processes was not yet established, and the nature of the emitting state remained unclear[10]. As a consequence, these results attracted little immediate attention and were met with considerable skepticism, since no satisfactory theoretical interpretation of such long-lived emission was available at that time.

In 1971, two fundamental papers were published dealing with the determination of the quantum yield of luminescence. These studies established the basis for understanding the photophysics of charge-transfer complexes[11][12]. Prior to this time, considerable discussion had existed concerning the origin of the emission from ruthenium complexes, particularly whether it should be assigned to singlet excited states or to metal-centered d–d transitions. This question had largely been clarified in 1968, when Klassen and Crosby investigated the emission spectra of nine ruthenium(II) ($4d^6$) complexes at 77 K. They demonstrated that the characteristic emission bands were remarkably similar despite substantial differences in ligand structure. Furthermore, both experimental observations and theoretical analysis showed that the excitation energies did not correlate with the values predicted by crystal field theory if the excited states were regarded as metal-centered d–d transitions. Instead, the

[8] Burstall F. H. Optical activity dependent on coordinated bivalent ruthenium. *Journal of the Chemical Society*. 1936. P. 173–175. DOI: 10.1039/JR9360000173

[9] Morgan G., Burstall F. H. Researches on residual affinity and co-ordination. Part XXXVII. Complex metallic salts containing 2:6-di-2′-pyridylpyridine (2:2′:2″-tripyridyl). *Journal of the Chemical Society*. 1937. P. 1649–1655. DOI: 10.1039/JR9370001649

[10] Paris J. P., Brandt W. W. Charge transfer luminescence of a ruthenium(II) chelate. *Journal of the American Chemical Society*. 1959. Vol. 81, No. 18. P. 5001–5002. DOI: 10.1021/ja01527a064

[11] Crosby G. A., Demas J. N. Quantum efficiencies on transition metal complexes. II. Charge-transfer luminescence. Journal of the American Chemical Society. 1971. Vol. 93, No. 12. P. 2841–2847. DOI: 10.1021/ja00741a003

[12] Crosby G. A., Demas J. N. Measurement of photoluminescence quantum yields. *Journal of Chemical Education*. 1971. Vol. 75, No. 8. P. 991–1024. DOI: 10.1021/j100678a001

observed emission spectra were found to be in good agreement with a metal-to-ligand charge-transfer (MLCT) model, in which excitation involves the transfer of an electron from a metal d orbital to an antibonding orbital of the coordinated organic ligand[13] (Figure 1c).

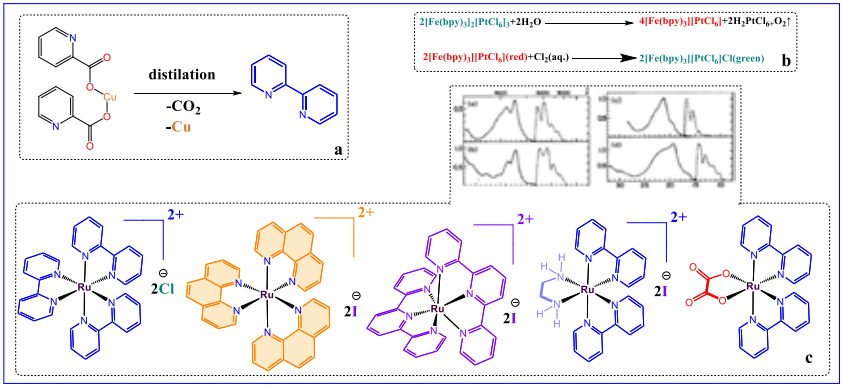


Fig. 1. Synthesis of 2,2′-bipyridine and the first metal complexes based on it

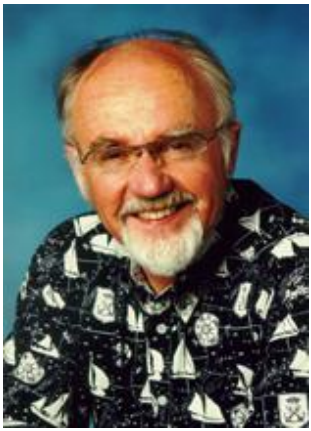
Although Klassen and Crosby demonstrated that luminescence is associated with a metal-to-ligand charge-transfer process, they had previously argued, in 1965, that charge transfer occurs only during the absorption of light. They proposed that this excited state subsequently undergoes a radiationless transition to a lower-lying state, from which the observed luminescence originates[14]. Consequently, the final emitting state was assigned to a metal-centered d–d excited state. Owing to Crosby's authority in the field, this interpretation became generally accepted.

In 1966, Richard Palmer and Thomas Piper examined single crystals in polarized light and investigated their absorption spectra. Their results clearly demonstrated that the absorption bands observed in the visible region correspond to allowed metal-to-ligand charge-transfer (MLCT) transitions. Thus, their experimental observations confirmed Crosby's interpretation of the absorption process, but did not provide evidence for the nature of the emitting state. Since the intense MLCT absorption band appeared near 450 nm, Palmer and Piper

[13] Klassen D. M. Spectroscopic Studies of Ruthenium(II) Complexes. Assignment of the Luminescence. *The Journal of Chemical Physics*. 1968. Vol. 48, No. 4. P. 1853–1858. DOI: 10.1063/1.1668922

[14] Crosby G. A., Perkins W. G., Klassen D. M. Luminescence from Transition-Metal Complexes: Tris(2,2′-bipyridine)- and Tris(1,10-phenanthroline)Ruthenium(II). *The Journal of Chemical Physics*. 1965. Vol. 43, No. 5. P. 1498–1503. DOI: 10.1063/1.1696960

assumed d–d absorption bands, which according to Crosby's model should lie at slightly lower energy, were simply obscured by the much stronger MLCT transition. It was later established, however, that the crystal-field splitting places the metal-centered d–d states above the MLCT excited state rather than below it. However, the value of the crystal field splitting parameter (Δ), estimated by Palmer and Piper from their absorption spectral studies, demonstrated that the excited d–d states should lie significantly higher in energy than the MLCT state[15].



Richard Palmer

In 1973, Harrigan proposed an electronic coupling model describing the symmetry of the lowest triplet MLCT excited state, thereby establishing the theoretical framework that forms the basis of the modern interpretation of the photophysics of Ru(II) polypyridyl complexes[16] (Figure 2).

A decisive step was made in 1972, when Geoffroy and Adamson demonstrated that $[Ru(bpy)_3]^{2+}$ is capable of intermolecular electron transfer. They reported the reaction between the photoexcited ruthenium complex and $[Co(NH_3)_5Cl]^{2+}$, showing that the cobalt complex acts as a one-electron oxidant and that the excited ruthenium complex undergoes a simple single-electron-transfer process[17].

---

[15] Palmer R. A., Piper T. S. 2,2′-Bipyridine Complexes. I. Polarized Crystal Spectra of Tris(2,2′-bipyridine)copper(II), -nickel(II), -cobalt(II), -iron(II), and -ruthenium(II). *Inorganic Chemistry*. 1966. Vol. 5, No. 5. P. 864–878. DOI: 10.1021/ic50039a034

[16] Harrigan R. W. Symmetry assignments of the lowest CT excited states of ruthenium(II) complexes via a proposed electronic coupling model. The Journal of Chemical Physics. 1973. Vol. 59, No. 7. P. 3468–3476. DOI: 10.1063/1.1680504

[17] Gafney H. D., Adamson A. W. Excited state $Ru(bipyr)3^{2+}$ as an electron-transfer reductant. *Journal of the American Chemical Society*. 1972. Vol. 94, No. 23. P. 8238–8239. DOI: 10.1021/ja00778a054

In the same year, Akira Fujishima and Kenichi Honda reported the first photocatalytic decomposition of water under ultraviolet irradiation. Using a titanium dioxide photoanode and a platinum cathode, they demonstrated that illumination with ultraviolet light resulted in the evolution of oxygen and hydrogen. This discovery, which later became known as the Honda–Fujishima effect, represented the first successful example of light-driven water splitting and marked the beginning of heterogeneous semiconductor photocatalysis[18] (Figure 3).

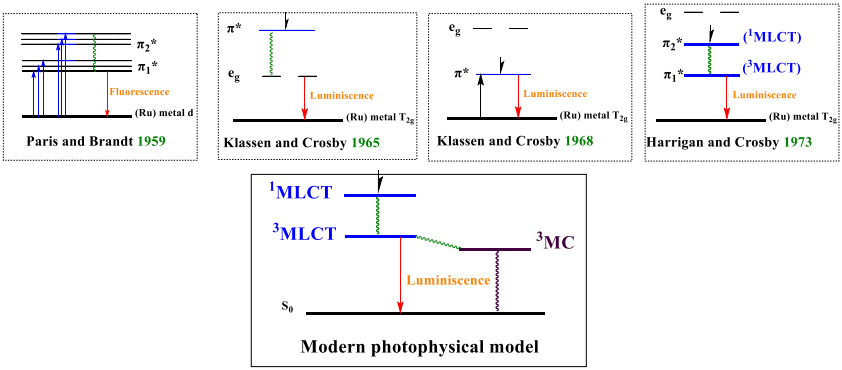


Fig. 2. Evolution of the electronic-state model for the luminescence of tris(2,2′-bipyridine)ruthenium(II), 1959–present

In 1974, Thomas J. Meyer, David G. Whitten, and Charles Bock made the next important advance by providing a detailed description of the concept of photoinduced electron transfer (PET)[19]. Using flash photolysis, they measured the rate of electron transfer from the excited state of $[Ru(bpy)_3]^{2+}$ to methyl viologen (MV^{2+}). This process resulted in the formation of the characteristic deep-blue radical cation $MV^{\bullet+}$, thereby providing direct experimental evidence for bimolecular photoinduced electron transfer (Figure 4a).

[18] Fujishima A., Honda K. Electrochemical photolysis of water at a semiconductor electrode. *Nature*. 1972. Vol. 238. P. 37–38. DOI: 10.1038/238037a0

[19] Bock C. R., Meyer T. J., Whitten D. G. Electron transfer quenching of the luminescent excited state of tris(2,2′-bipyridine)ruthenium(II). Flash photolysis relaxation technique for measuring the rates of very rapid electron transfer reactions. *Journal of the American Chemical Society*. 1974. Vol. 96, No. 14. P. 4710–4712. DOI: 10.1021/ja00821a078

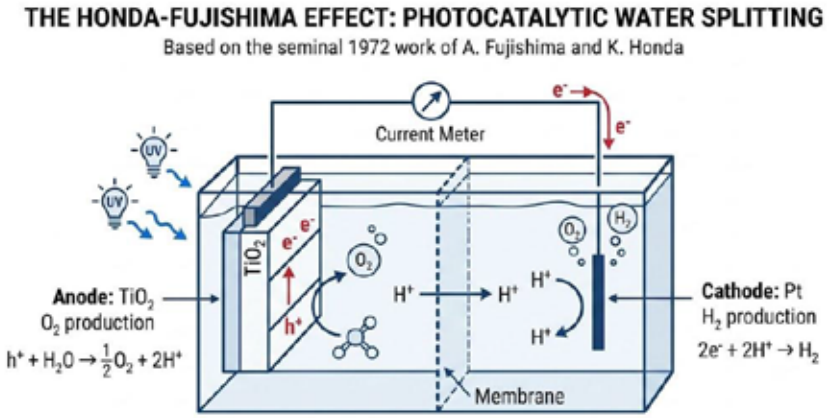


Fig. 3. The Honda–Fujishima Effect

In 1977, the future Nobel laureates Jean-Marie Lehn and Jean-Pierre Sauvage proposed the first three-component system for the photochemical production of hydrogen under visible-light irradiation[20, 21]. Almost simultaneously, in 1978–1979, Michael Grätzel and Jean Kiwi reported a series of studies in which the efficiency of hydrogen evolution was substantially improved through the optimization of colloidal noble-metal catalysts[22, 23] (Figure 4b).

Although these systems suffered from rapid deactivation, they provided the first convincing demonstration that solar energy could be utilized for the formation of chemical bonds. These investigations established the foundation for the subsequent development of artificial photosynthesis and solar fuel chemistry.

In 1978, Richard Kellogg and co-workers demonstrated that $[Ru(bpy)_3]^{2+}$ is capable of catalyzing the photoreduction of sulfonium salts in the presence of dihydropyridines as sacrificial electron donors. Although this work did not yet recognize photoredox catalysis as an independent field of organic synthesis, it

[20] Lehn J.-M., Sauvage J.-P. Chemical storage of light energy: Catalytic generation of hydrogen by visible light or sunlight irradiation of neutral aqueous solutions. Nouveau Journal de Chimie. 1977. Vol. 1. No. 14. P. 449–451

[21] Kirch M., Lehn J.-M., Sauvage J.-P. Hydrogen generation by visible light irradiation of aqueous solutions of metal complexes. An approach to the photochemical conversion and storage of solar energy. *Helvetica Chimica Acta*. 1979. Vol. 62, No. 4. P. 1345–1384. DOI: 10.1002/hlca.19790620449

[22] Kalyanasundaram K., Kiwi J., Grätzel M. Hydrogen evolution from water by visible light, a homogeneous three component test system for redox catalysis. *Helvetica Chimica Acta*. 1978. Vol. 61. P. 2720–2730. DOI: 10.1002/hlca.19780610740

[23] Kiwi J., Grätzel M. Hydrogen evolution from water induced by visible light mediated by redox catalysis. *Nature*. 1979. Vol. 281. P. 657–658. DOI: 10.1038/281657a0

is now generally regarded as the first example of the application of a ruthenium polypyridyl complex in photoredox catalysis[24] (Figure 4c).

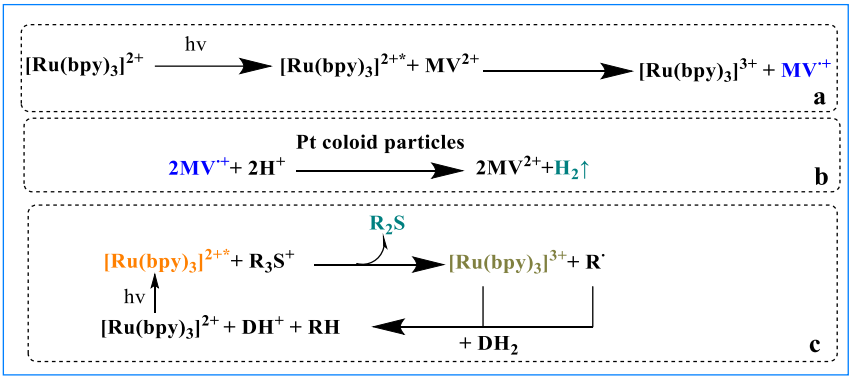


Fig. 4. Early Photophysical Reactions

2. Establishment of Photoredox Catalysis (1978–2007)

One of the earliest examples of the use of $[Ru(bpy)_3]^{2+}$ as a photocatalyst in organic synthesis is generally attributed to the work of C. Pac and co-workers, published in 1981[25]. In this study, the authors demonstrated the photocatalytic reduction of electron-deficient olefins employing the tris(bipyridine)ruthenium(II) complex as the photosensitizer. At that time, the investigation was directed primarily toward the elucidation of photochemical mechanisms and electron-transfer processes rather than toward the development of a general synthetic methodology.

During the following years, the studies of Deronzier, Cano, and other investigators demonstrated that both oxidative and reductive transformations could be controlled by means of photoinduced electron transfer[26]. These investigations gradually established the experimental basis upon which the modern concept of photoredox catalysis was later developed[27].

---

[24] Hedstrand D. M., Kruizinga W. H., Kellogg R. M. Light induced and dye accelerated reductions of phenacyl onium salts by 1,4-dihydropyridines. *Tetrahedron Letters*. 1978. Vol. 19, No. 14. P. 1255–1258. DOI: 10.1016/S0040-4039(01)94515-0

[25] Pac C., Ihama M., Yasuda M., Miyauchi Y., Sakurai H. Tris(2,2′-bipyridine)ruthenium(2+)-mediated photoreduction of olefins with 1-benzyl-1,4-dihydronicotinamide: a mechanistic probe for electron-transfer reactions of NAD(P)H-model compounds. *Journal of the American Chemical Society*. 1981. Vol. 103, No. 21. P. 6495–6497. DOI: 10.1021/ja00411a040

[26] Cano-Yelo H., Deronzier A. Photo-oxidation of some carbinols by the Ru(II) polypyridyl complex-aryl diazonium salt system. *Tetrahedron Letters*. 1984. Vol. 25, No. 48. P. 5517–5520. DOI: 10.1016/S0040-4039(01)81614-2

[27] Cano-Yelo H., Deronzier A. Photocatalysis of the Pschorr reaction by tris-(2,2′-bipyridyl) ruthenium(II) in the phenanthrene series. *Journal of the Chemical Society, Perkin Transactions 2*. 1984. Vol. 13, No. 6. P. 1093–1098. DOI: 10.1039/P29840001093

A major limitation of the classical three-component photochemical systems developed during the late 1970s was that electron transfer depended upon random diffusional encounters between the reacting species in solution. In addition, rapid back electron transfer considerably reduced the overall efficiency of the process.

To overcome these limitations, Vincenzo Balzani and Franco Scandola introduced, in the late 1980s, the concept of supramolecular photochemistry and photochemical molecular devices (PMDs). In particular, Balzani proposed that a ruthenium photosensitizer could be enclosed within a rigid three-dimensional molecular framework (a cryptand) (Figure 5b). Such encapsulation increased the rigidity of the system, prolonged the lifetime of the excited state, and protected the complex against photochemical degradation during charge transfer by nearly four orders of magnitude[28]. This concept stimulated extensive experimental work during the first half of the 1990s. Experimental confirmation was obtained following the synthesis of the first covalently linked donor–acceptor dyads and triads. Ruthenium(II) polypyridyl complexes became the classical model systems of this period and served as the basis for numerous investigations of long-range electron transfer and artificial photosynthetic assemblies.

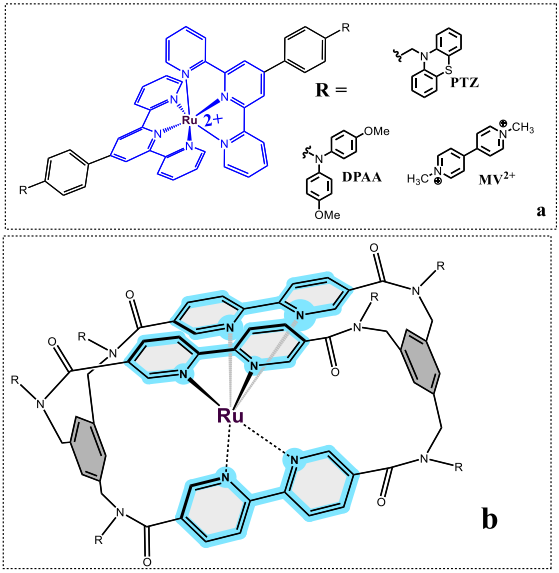


Fig. 5. Ruthenium Supramolecular Complexes

[28] Balzani V., Moggi L., Scandola F. Towards a supramolecular photochemistry: Assembly of molecular components to obtain photochemical molecular devices. In: Supramolecular Photochemistry. Dordrecht: Reidel Publishing Company, 1987. P. 1–28. DOI: 10.1007/978-94-009-3979-0_1

In the studies of Jean-Pierre Sauvage, Luisa De Cola, Lucia Flamigni, and Vincenzo Balzani, a series of donor–acceptor dyads and triads based on ruthenium bis(terpyridine) complexes covalently linked to methyl viologen, quinones, and other electron donors and acceptors was prepared[29] (Figure 5a). Investigation of these systems provided experimental confirmation of the supramolecular photochemical concept and established the foundation for the further development of photochemical molecular devices (PMDs).

During the 1990s, the concept of supramolecular photochemistry underwent rapid development. The principal efforts were directed toward the construction of increasingly sophisticated donor–acceptor dyads, triads, and multinuclear supramolecular assemblies. At the same time, considerable attention was devoted to the development of photochemical molecular devices and molecular machines, which represented an important step toward the realization of artificial photosynthetic systems[30].

Despite the remarkable progress achieved with supramolecular assemblies, their practical application remained limited owing to the extensive use of complexes of expensive noble metals. This circumstance stimulated the search for new classes of photocatalysts based entirely on organic molecules, capable of performing analogous photoinduced electron-transfer processes without the use of transition metals.

A major contribution to the modern understanding of electron-transfer reactions was made by Shunichi Fukuzumi. His research covered fundamental aspects of photoinduced and thermal electron transfer, the mechanisms of radical-ion formation, the influence of the reaction medium on electron-transfer rates, and the design of model systems that mimic the natural photosynthetic reaction center.

In one of his fundamental reviews[31], Fukuzumi summarized the mechanisms of acid- and cation-promoted electron-transfer reactions and demonstrated the general principles governing these processes (Figure 6).

In the same year (1997), Fukuzumi, together with Matthias Patz, demonstrated that many classical nucleophilic addition reactions may proceed through an initial single-electron-transfer (SET) step involving the formation of radical-ion intermediates. The factors governing the transition from conventional

[29] Collin J.-P., Guillerez S., Sauvage J.-P., Barigelletti F., De Cola L., Flamigni L., Balzani V. Photoinduced processes in dyads and triads containing a ruthenium(II)-bis(terpyridine) photosensitizer covalently linked to electron donor and acceptor groups. *Inorganic Chemistry.* 1991. Vol. 30, No. 22. P. 4230–4238. DOI: 10.1021/ic00022a026

[30] Balzani V., Credi A., Venturi M. Photochemistry and photophysics of coordination compounds: An extended view. *Coordination Chemistry Reviews.* 1998. Vol. 171. P. 3–16. DOI: 10.1016/S0010-8545(98)90005-4

[31] Fukuzumi S. Catalysis on electron transfer and the mechanistic insight into redox reactions. *Bulletin of the Chemical Society of Japan*. 1997. Vol. 70, No. 1. P. 1–28. DOI: 10.1246/bcsj.70.1

two-electron pathways to single-electron mechanisms were systematically analyzed, and particular attention was devoted to the influence of the oxidation and reduction potentials of the reactants on the course of these reactions[32].

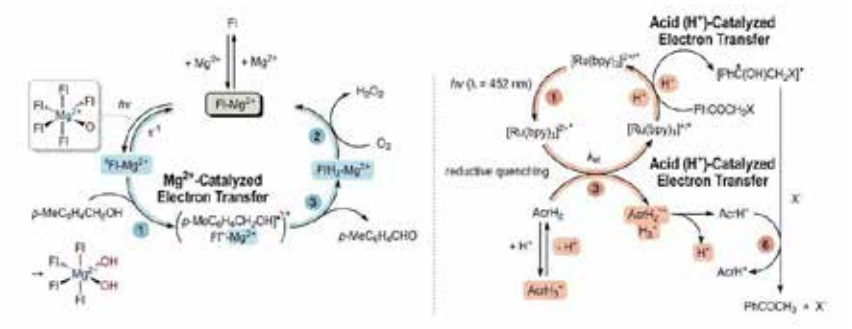


Fig. 6. Generalized Schemes of Cation and Acid Catalysis According to Fukuzumi

After a relatively short pause, Fukuzumi continued his investigations by developing a series of model systems that mimicked biological electron-transfer processes. Particular attention was devoted to artificial analogues of superoxide dismutase, hydride-transfer cofactors such as NAD^+ and $NADP^+$, and proton-transfer systems. He demonstrated that metal ions can profoundly modify the redox properties of coenzyme models, including pyrroloquinoline quinones (PQQ), tryptophan quinones, and flavins, thereby regulating both the rate and the direction of electron-transfer reactions. As one representative example, Fukuzumi described a model of bacterial methylamine dehydrogenase based on a metal complex containing a tryptophan quinone ligand. This system successfully mimicked the active site of the natural enzyme and enabled the dehydrogenation of amines under laboratory conditions[33]. It was further demonstrated that coordination of metal cations altered the redox potentials of these molecules and permitted catalytic transformations that scarcely occurred in the absence of the metal ions[34].

---

[32] Patz M., Fukuzumi S. Electron transfer in organic reactions. *Journal of Physical Organic Chemistry*. 1997. Vol. 10, No. 3. P. 129–137. DOI: 10.1002/(SICI)1099-1395(199703)10:3<129::AID-POC884>3.0.CO;2-4

[33] Itoh S., Taniguchi M., Takada N., Nagatomo S., Kitagawa T., Fukuzumi S. Effects of metal ions on the electronic, redox, and catalytic properties of cofactor TTQ of quinoprotein amine dehydrogenases. *Journal of the American Chemical Society*. 2000. Vol. 122. P. 12087–12097. DOI: 10.1021/ja0020207

[34] Fukuzumi S., Itoh S. Catalytic control of redox reactivities of coenzyme analogs by metal ions. *Antioxidants & Redox Signaling*. 2001. Vol. 3, No. 5. P. 807–824. DOI: 10.1089/15230860152664993

An important stage in these studies was the experimental investigation of photoinduced electron transfer between neutral electron donors and acridinium cations. It was shown that charge-shift electron-transfer processes proceed efficiently in both polar and non-polar solvents, thus considerably extending the range of systems suitable for artificial photochemical charge separation. A further advance in the development of artificial photosynthetic systems was achieved with the construction of donor–acceptor assemblies exhibiting remarkably long-lived charge-separated states. In one such system, the lifetime of the charge-separated state reached approximately 380 ms, representing one of the longest values reported for artificial photosynthetic models at that time[35]. One of Fukuzumi's most influential contributions[36] was the development of the donor–acceptor system 9-mesityl-10-methylacridinium (Acr^+–Mes), in which the mesityl fragment served as the electron donor and the acridinium cation as the electron acceptor. The nearly perpendicular arrangement of the two aromatic units minimized π-conjugation between them and substantially reduced the reorganization energy associated with electron transfer. Upon photoexcitation, the system produced a long-lived charge-separated state, $Acr^{\bullet}$–$Mes^{\bullet+}$, with a quantum yield of approximately 98%. The energy of this state was 2.37 eV, nearly five times greater than that of the charge-separated state in the natural photosynthetic reaction center (approximately 0.50 eV). At 203 K, the lifetime of the charge-separated state reached 2 h, representing one of the longest-lived artificial donor–acceptor systems reported at that time.

Early in 2004, Fukuzumi reported the preparation of this exceptionally long-lived charge-separated system. Later in the same year, he demonstrated for the first time its practical application as a photocatalyst for the photooxidation of anthracene and tetramethylethylene by molecular oxygen. This work marked the beginning of acridinium photoredox catalysis as a distinct area of organic photocatalysis[37].

During the following years, Fukuzumi further expanded the scope of acridinium photoredox catalysis by investigating the mechanisms of photoinduced electron transfer, the activation of molecular oxygen, the formation of reactive

[35] Imahori H., Guldi D. M., Tamaki K., Yoshida Y., Luo C., Sakata Y., Fukuzumi S. Charge separation in a novel artificial photosynthetic reaction center lives 380 ms. *Journal of the American Chemical Society*. 2001. Vol. 123, No. 27. P. 6617–6628. DOI: 10.1021/ja004123v

[36] Fukuzumi S., Kotani H., Ohkubo K., Ogo S., Tkachenko N. V., Lemmetyinen H. Electron-transfer state of 9-mesityl-10-methylacridinium ion with a much longer lifetime and higher energy than that of the natural photosynthetic reaction center. *Journal of the American Chemical Society*. 2004. Vol. 126, No. 6. P. 1600–1601. DOI: 10.1021/ja038656q

[37] Kotani H., Ohkubo K., Fukuzumi S. Photocatalytic oxygenation of anthracenes and olefins with dioxygen via selective radical coupling using 9-mesityl-10-methylacridinium ion as an effective electron-transfer photocatalyst. *Journal of the American Chemical Society*. 2004. Vol. 126, No. 49. P. 15999–16006. DOI: 10.1021/ja048353b

oxygen species, and the influence of Lewis acids on photocatalytic efficiency. These studies established the foundations for his subsequent contributions to artificial photosynthesis and the photocatalytic conversion of solar energy.

In the following years, Fukuzumi continued to develop acridinium photoredox catalysis by investigating the mechanisms of photoinduced electron transfer, the activation of molecular oxygen, the formation of reactive oxygen species, and the influence of Lewis acids on the efficiency of photocatalytic processes. These studies provided the foundation for his subsequent work in the fields of artificial photosynthesis and photocatalytic conversion of solar energy.

Beginning in the second half of the 2010s, Fukuzumi gradually shifted his research from the development of individual organic photocatalysts toward the design of integrated artificial photosynthetic systems. In particular, he reviewed contemporary approaches to the photocatalytic production of hydrogen as a clean and sustainable fuel. Special attention was also given to the problems of hydrogen storage and transportation, which remain among the principal challenges of the hydrogen economy[38].



Shunichi Fukuzumi

After 2015, one of the major directions of Fukuzumi's research became the use of hydrogen peroxide as an alternative solar fuel. He demonstrated the possibility of photocatalytic synthesis of H_2O_2 directly from water and molecular oxygen under solar irradiation and further showed its potential application in fuel cells for the direct generation of electrical energy. In contrast to molecular hydrogen, hydrogen peroxide is a liquid under ambient conditions, which greatly simplifies its storage, transportation, and practical use[39].

[38] Fukuzumi S. Artificial photosynthetic systems for production of hydrogen. *Current Opinion in Chemical Biology.* 2015. Vol. 25. P. 18–26. DOI: 10.1016/j.cbpa.2014.12.008

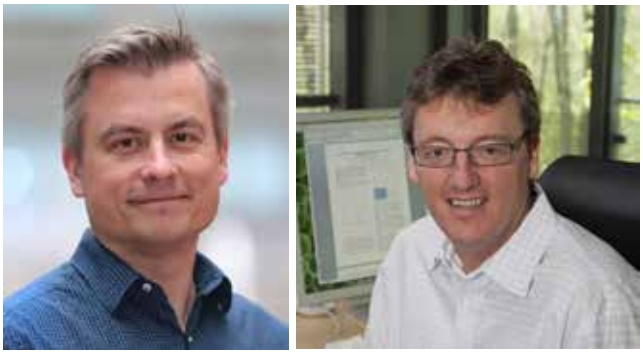
[39] Fukuzumi S. Artificial photosynthesis for production of hydrogen peroxide and its fuel cells. *Biochimica et Biophysica Acta.* 2016. Vol. 1857, No. 5. P. 604–611. DOI: 10.1016/j.bbabio.2015.08.012

3. Modern Development of Photoredox Catalysis (2008–2026)



Tehshik Yoon

While Fukuzumi was engaged in the synthesis of new acridinium systems and in the study of their application in photocatalysis, the field of photoredox catalysis entered a new stage of development at the end of 2008. In September of that year, Tehshik P. Yoon and co-workers demonstrated that the complex $Ru(bpy)_3^{2+}$ could promote visible-light-induced [2+2] cycloaddition reactions of enones, thereby revealing the considerable synthetic potential of such transformations[40].



David Nicewicz and David MacMillan

Only one month later, David W. C. MacMillan and David A. Nicewicz published in Science the first example of combining photoredox catalysis

[40] Ischay M. A., Anzovino M. E., Du J., Yoon T. P. Efficient visible light photocatalysis of [2+2] enone cycloadditions. *Journal of the American Chemical Society.* 2008. Vol. 130, No. 39. P. 12886–12887. DOI: 10.1021/ja805387f

with organocatalysis for the asymmetric α-alkylation of aldehydes. This work demonstrated that photoredox catalysis could serve as a general platform for complex organic transformations and is now widely regarded as the beginning of the modern era of visible-light photoredox catalysis[41].

A further advance followed in 2009, when Corey R. J. Stephenson demonstrated the broad applicability of ruthenium polypyridyl complexes in radical reactions of organic synthesis. The contributions of Yoon, MacMillan, Nicewicz, and Stephenson established the modern concept of visible-light photoredox catalysis, which during the following decade became one of the most rapidly developing areas of synthetic organic chemistry[42].

Following these pioneering studies of 2008–2009, photoredox catalysis rapidly evolved into an independent field of modern organic synthesis. Between 2010 and 2012 numerous new photocatalytic transformations were reported, including alkylation, fluoroalkylation, cycloaddition, and radical functionalization of organic molecules. At the same time, the theoretical foundations of the field were established, and the mechanisms of photoinduced electron transfer were systematically reviewed. As a result, photoredox catalysis came to be regarded not as a specialized branch of photochemistry, but as a general synthetic strategy applicable to a wide range of organic reactions[43].

An important step in the further development of the field was the combination of photoredox catalysis with organocatalysis. Soon after the first report of MacMillan and Nicewicz, methods for the asymmetric trifluoromethylation of aldehydes were developed, considerably expanding the scope of radical functionalization of carbonyl compounds.

At approximately the same time, the efficient introduction of trifluoromethyl groups into arenes and heteroarenes under visible-light irradiation was demonstrated. These transformations proved to be of considerable value for the synthesis of biologically active molecules and pharmaceutical compounds. Collectively, these studies demonstrated that photoredox catalysis was applicable not only to model reactions but also to synthetically important transformations[44].

---

[41] Nicewicz D. A., MacMillan D. W. C. Merging photoredox catalysis with organocatalysis: the direct asymmetric alkylation of aldehydes. *Science*. 2008. Vol. 322. P. 77–80. DOI: 10.1126/science.1161976

[42] Narayanam J. M. R., Tucker J. W., Stephenson C. R. J. Electron-transfer photoredox catalysis: development of a tin-free reductive dehalogenation reaction. *Journal of the American Chemical Society*. 2009. Vol. 131, No. 25. P. 8756–8757. DOI: 10.1021/ja9033582

[43] Narayanam J. M. R., Stephenson C. R. J. Visible light photoredox catalysis: applications in organic synthesis. *Chemical Society Reviews*. 2011. Vol. 40, No. 1. P. 102–113. DOI: 10.1039/B913880N

[44] Pham P. V., Nagib D. A., MacMillan D. W. C. Photoredox catalysis: a mild, operationally simple approach to the synthesis of α-trifluoromethyl carbonyl compounds. *Angewandte Chemie International Edition*. 2011. Vol. 50. P. 6119–6122. DOI: 10.1002/anie.201101861



Corey Stephenson

The early studies in modern photoredox catalysis were based primarily on the $Ru(bpy)_3^{2+}$ complex. It soon became evident, however, that its reducing power was insufficient for the activation of many organic substrates. This limitation was overcome by the use of the fac-$Ir(ppy)_3$ complex, originally synthesized in 1985[45] but first introduced into photoredox catalysis on a broad scale by Corey Stephenson in the early 2010s[46]. Owing to its more negative excited-state reduction potential, this complex enabled transformations that were inaccessible to ruthenium photocatalysts and initiated the rapid development of iridium-based photocatalytic systems. Compared with $Ru(bpy)_3^{2+}$, iridium complexes possess longer-lived triplet excited states, a broader range of redox potentials, and higher photostability[47]. These properties make them effective in reactions requiring stronger photooxidants or photoreductants, and they rapidly became one of the principal classes of photocatalysts in modern organic synthesis.

[45] King K. A., Spellane P. J., Watts R. J. Excited-state properties of a triply ortho-metalated iridium(III) complex. *Journal of the American Chemical Society*. 1985. Vol. 107, No. 5. P. 1431–1432. DOI: 10.1021/ja00291a064

[46] Nguyen J., D'Amato E., Narayanam J. et al. Engaging unactivated alkyl, alkenyl and aryl iodides in visible-light-mediated free radical reactions. *Nature Chemistry.* 2012. Vol. 4. P. 854–859. DOI: 10.1038/nchem.1452

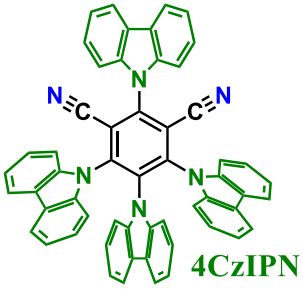
[47] Condie A. G., Gonzalez-Gomez J. C., Stephenson C. R. J. Visible-light photoredox catalysis: aza-Henry reactions via C–H functionalization. *Journal of the American Chemical Society*. 2010. Vol. 132, No. 5. P. 1464–1465. DOI: 10.1021/ja909145y



Burkhard König

In 2011, the groups of Burkhard König and Kirsten Zeitler published one of the first studies comparing the performance of organic dyes with that of the classical photocatalyst $Ru(bpy)_3^{2+}$. They demonstrated that eosin Y afforded results comparable to those obtained with the ruthenium complex in a number of representative transformation. This work provided important experimental evidence that organic dyes could serve as inexpensive and readily available alternatives to photocatalysts based on precious metals[48]. Although eosin- and fluorescein-derived dyes did not become the principal photocatalysts of the field, they represented the first important step toward the development of metal-free organic photocatalysis.





Chihaya Adachi

One of the most significant advances in metal-free photocatalysis was the introduction of a new class of donor–acceptor organic photocatalysts based

[48] Neumann M., Füldner S., König B., Zeitler K. Metal-free, cooperative asymmetric organophotoredox catalysis with visible light. *Angewandte Chemie International Edition.* 2011. Vol. 50, No. 4. P. 951–954. DOI: 10.1002/anie.201002992

on carbazole and dicyanobenzene. In 2012, Adachi and co-workers prepared 2,4,5,6-tetra(9H-carbazol-9-yl)isophthalonitrile (4CzIPN) as an emitter for organic light-emitting diodes (OLEDs). Owing to the phenomenon of thermally activated delayed fluorescence (TADF), this compound exhibited a long-lived excited state, excellent photostability, and favorable redox properties. These characteristics subsequently made 4CzIPN one of the most efficient organic photocatalysts, capable of replacing ruthenium and iridium[49] complexes in many photoredox transformations.

The introduction of 4CzIPN stimulated the rapid development of TADF photocatalysts and demonstrated that highly efficient visible-light photoredox catalysis could be achieved without the use of precious metals. Since that time, numerous donor–acceptor organic photocatalysts have been developed, greatly expanding the scope of metal-free photoredox catalysis.

Despite the rapid development of donor–acceptor TADF photocatalysts, acridinium salts have retained their importance. The further development of this class is closely associated with the work of David A. Nicewicz, who considerably expanded the synthetic applications of acridinium photocatalysts. In contrast to ruthenium and iridium complexes, acridinium salts possess exceptionally high excited-state oxidation potentials (typically exceeding +2.0 V vs SCE), allowing the activation of unfunctionalized arenes, alkenes, and other electron-rich substrates through single-electron oxidation[50].

In 2014, the group of Nicewicz published a series of papers demonstrating the use of 9-mesityl-10-methylacridinium salts as efficient organic photocatalysts, particularly for the photocatalytic functionalization of alkenes[51]. Acridinium photocatalysts did not replace Ru(II)- and Ir(III)-based systems; instead, they occupied a distinct position owing to their substantially higher excited-state oxidation potentials, the absence of precious metals, the relative simplicity of their synthesis, and their lower cost. These properties enabled transformations that were inaccessible to most ruthenium- and iridium-based photocatalysts.

By the period 2015–2017, photoredox catalysis had become established as an independent discipline within modern organic chemistry. Attention gradually shifted from the discovery of new reactions toward the consolidation of accumulated knowledge, the development of new classes of photocatalysts,

[49] Uoyama H., Goushi K., Shizu K., Nomura H., Adachi C. Highly efficient organic light-emitting diodes from delayed fluorescence. *Nature*. 2012. Vol. 492, No. 7428. P. 234–238. DOI: 10.1038/nature11687

[50] Nicewicz D. A., Nguyen T. M. Recent applications of organic dyes as photoredox catalysts in organic synthesis. *ACS Catalysis*. 2014. Vol. 4, No. 1. P. 355–360. DOI: 10.1021/cs400956a

[51] Romero N. A., Nicewicz D. A. Mechanistic insight into the photoredox catalysis of anti-Markovnikov alkene hydrofunctionalization reactions. *Journal of the American Chemical Society*. 2014. Vol. 136, No. 49. P. 17024–17035. DOI: 10.1021/ja506228u

and the expansion of their synthetic applications. During this period, two comprehensive review articles published in Chemical Reviews summarized nearly a decade of progress in modern photoredox catalysis.

Another major advance occurred in 2014 with the emergence of dual metallaphotoredox catalysis. The group of David W. C. MacMillan demonstrated that the combination of an iridium photocatalyst with a nickel catalyst enabled the decarboxylative cross-coupling of alkyl carboxylic acids with aryl halides under remarkably mild conditions. The photoexcited iridium complex generated alkyl radicals through single-electron transfer, whereas the nickel catalyst mediated the conventional cross-coupling cycle. This strategy successfully combined the advantages of photoredox catalysis with transition-metal catalysis and established a new direction in modern organic synthesis[52]. Shortly thereafter, the concept was extended to numerous C–C, C–N, C–O, and C–S bond-forming reactions, making dual nickel/photoredox catalysis one of the most rapidly expanding areas of synthetic chemistry.

The review by Tehshik P. Yoon, Dual Catalysis Strategies in Photochemical Synthesis (2016), focused on the development of dual catalytic systems in which photoredox catalysis was combined with organocatalysis, transition-metal catalysis, Lewis acid catalysis, and other catalytic strategies[53].

In the same year, David A. Romero and David A. Nicewicz published the review «Organic Photoredox Catalysis»[54], in which the principal classes of organic photocatalysts were systematically summarized for the first time. This review established the modern view that photoredox catalysis had evolved along two major directions: transition-metal photoredox catalysis, based primarily on ruthenium and iridium complexes, and organic photoredox catalysis, represented by a broad range of metal-free photocatalysts.

Following the introduction of 4CzIPN, studies published during 2016–2017 demonstrated that this organic photocatalyst could efficiently replace ruthenium- and iridium-based complexes in a variety of photoredox transformations. The work of the groups of Gary A. Molander[55] and Burkhard König[56] showed that the combination of a long-lived excited state, high photostability, and favorable

[52] Zuo Z. et al. Merging photoredox with nickel catalysis: Coupling of α-carboxyl sp3-carbons with aryl halides. *Science*. 2014. Vol. 345. P. 437–440. DOI: 10.1126/science.1255525

[53] Skubi K. L., Blum T. R., Yoon T. P. Dual catalysis strategies in photochemical synthesis. *Chemical Reviews*. 2016. Vol. 116, No. 17. P. 10035–10074. DOI: 10.1021/acs.chemrev.6b00018

[54] Romero N. A., Nicewicz D. A. Organic photoredox catalysis. *Chemical Reviews*. 2016. Vol. 116, No. 17. P. 10075–10166. DOI: 10.1021/acs.chemrev.6b00057

[55] Patel N. R., Kelly C. B., Siegenfeld A. P., Molander G. A. Mild, redox-neutral alkylation of imines enabled by an organic photocatalyst. *ACS Catalysis*. 2017. Vol. 7. P. 1766–1770. DOI: 10.1021/acscatal.6b03665

[56] König B. Photocatalysis in organic synthesis – past, present, and future. *European Journal of Organic Chemistry.* 2017. P. 1979–1981. DOI: 10.1002/ejoc.201700420

redox properties enabled 4CzIPN to achieve catalytic efficiencies comparable to those of many Ru(II) and Ir(III) photocatalysts, while eliminating the need for precious metals[57].



Gary Molander

Following 2016, one of the most rapidly developing areas became the application of donor–acceptor organic molecules exhibiting thermally activated delayed fluorescence (TADF). In many photoredox transformations these photocatalysts proved to be efficient alternatives to ruthenium and iridium complexes.

At the same time, new applications of photoredox catalysis were actively explored. Considerable progress was achieved in electrophotocatalysis, continuous-flow photochemistry[58], and in the photocatalytic conversion of CO_2, nitrogen, water, and molecular oxygen. Current research is increasingly directed toward the development of energy-efficient and environmentally sustainable photocatalytic processes.

The emergence of efficient organic photocatalysts also stimulated the development of new synthetic methods for their preparation. At the end of 2017, Christoph Sparr reported a convenient one-step synthetic approach to acridinium, xanthylium, and silicon-rhodamine (SiR) fluorophores. Silicon-rhodamine dyes had originally been introduced in 2008[59] and rapidly found

[57] Huang H., Li X., Yu C., Zhang Y., Mariano P. S., Wang W. Visible-light-promoted nickel- and organic-dye-cocatalyzed formylation reaction of aryl halides and triflates and vinyl bromides with diethoxyacetic acid as a formyl equivalent. *Angewandte Chemie International Edition*. 2017. Vol. 56, No. 6. P. 1500–1505. DOI: 10.1002/anie.201610108

[58] Politano F., Oksdath-Mansilla G. Light on the horizon: current research and future perspectives in flow photochemistry. *Organic Process Research & Development*. 2018. Vol. 22. P. 1045–1062. DOI: 10.1021/acs.oprd.8b00213

[59] Fu M., Xiao Y., Qian X., Zhao D., Xu Y. A design concept of long-wavelength fluorescent analogs of rhodamine dyes: replacement of oxygen with silicon atom. *Chemical Communications*. 2008. No. 15. P. 1780–1782. DOI: 10.1039/B718544H

widespread application in fluorescence microscopy and bioimaging[60]. Owing to their absorption and emission in the red and near-infrared region of the spectrum, these compounds remain attractive candidates for the development of photocatalytic systems operating under long-wavelength irradiation.



Christoph Sparr

In 2019, Sparr further demonstrated that acridinium photocatalysts are capable of competing with the most widely used organic photocatalysts. Comparison with 4CzIPN revealed that while 4CzIPN afforded superior results in certain transformations, modified acridinium salts were more efficient in others. The authors concluded that the principal advantage of acridinium photocatalysts lies in their broad structural tunability, which is largely unavailable for 4CzIPN. Such structural flexibility permits systematic adjustment of their photophysical and redox properties, making it possible to optimize the photocatalyst for a particular transformation[61].

The continued development of photoredox catalysis has also led to the emergence of a new class of photoactive materials, namely organic semiconductor photocatalysts. In 2019, the groups of Burkhard König and Markus Antonietti demonstrated that carbon nitride can serve as an efficient heterogeneous photocatalyst for the functionalization of arenes and heteroarenes[62].

[60] Grimm J. B., Klein T., Kopek B. G., Shtengel G., Hess H. F., Sauer M., Lavis L. D. Synthesis of a far-red photoactivatable silicon-containing rhodamine for super-resolution microscopy. *Angewandte Chemie International Edition.* 2016. Vol. 55, No. 5. P. 1723–1727. DOI: 10.1002/anie.201509649

[61] Fischer C., Kerzig C., Zilate B., Wenger O. S., Sparr C. Modulation of acridinium organophotoredox catalysts guided by photophysical studies. *ACS Catalysis*. 2020. Vol. 10, No. 1. P. 210–215 DOI: 10.1021/acscatal.9b03606

[62] Ghosh I., Khamrai J., Savateev A., Shlapakov N., Antonietti M., König B. Organic semiconductor photocatalyst can bifunctionalize arenes and heteroarenes. *Science*. 2019. Vol. 365, No. 6451. P. 360–366. DOI: 10.1126/science.aaw3254



Bart Pieber

The next stage in the development of this field was the combination of organic semiconductor photocatalysts with transition-metal catalysis. In 2020, the group of Bartholomäus Pieber demonstrated that the use of carbon nitride in combination with nickel catalysis overcomes one of the principal limitations of dual photoredox catalysis, namely the deactivation of the nickel catalyst. This approach provided more stable C–N cross-coupling reactions, improved catalytic efficiency, and further demonstrated the potential of heterogeneous organic photocatalysts in dual catalytic systems[63].



Sukbok Chang

Another important contribution made in 2020 was reported by the group of Sukbok Chang, who synthesized a rhodium complex incorporating

[63] Gisbertz S., Reischauer S., Pieber B. Overcoming limitations in dual photoredox/nickel-catalysed C–N cross-couplings due to catalyst deactivation. *Nature Catalysis*. 2020. Vol. 3, P. 611–620. DOI: 10.1038/s41929-020-0473-6

an acridinium chromophore. This catalyst enabled efficient light-driven C–H arylation and C–H methylation reactions. The study demonstrated the feasibility of integrated photocatalytic systems in which the photosensitizer and the transition-metal complex operate as a single catalytic entity[64]. During the period 2021–2023, considerable attention was devoted to the preparation of new acridinium photocatalysts possessing modified redox properties, enhanced photostability, and improved selectivity[65]. At the same time, the development of dual metallaphotoredox catalysis, particularly nickel-based systems[66], continued rapidly. During these years, acridinium salts became firmly established as one of the most important classes of organic photocatalysts. Numerous new C–C, C–N, C–O, and C–S cross-coupling reactions, together with methods for direct C–H functionalization, were reported, considerably expanding the synthetic scope of modern photoredox catalysis[67].

A further development of the integrated metallaphotoredox concept was reported in 2024. A bifunctional photocatalyst was prepared in which a donor–acceptor organic photosensitizer structurally related to 4CzIPN was covalently linked to a bipyridine ligand capable of coordinating nickel ions. This molecular design combined the functions of the photosensitizer and the metal ligand within a single structure[68].

Unlike previous systems, where the semiconductor photocatalyst and the metal complex were employed as separate components, a different strategy was introduced in 2025. In this case, a MnSalen complex was covalently immobilized on the surface of graphitic carbon nitride. Besides improving catalytic efficiency, this approach also allowed repeated recovery and reuse of the catalyst[69].

During 2025–2026, research on graphitic carbon nitride (g-C_3N_4) became increasingly focused on controlling its crystallinity and defect structure in

---

[64] Kim J., Kim D., Chang S. Merging two functions in a single Rh catalyst system: Bimodular conjugate for light-induced oxidative coupling. *Journal of the American Chemical Society*. 2020. Vol. 142, No. 45. P. 19052–19057. DOI: 10.1021/jacs.0c09982

[65] Yan H., Zhu S., Xu H.-C. Integrating continuous-flow electrochemistry and photochemistry for the synthesis of acridinium photocatalysts via site-selective C–H alkylation. *Organic Process Research & Development*. 2021. Vol. 25, No. 12. P. 2608–2613. DOI: 10.1021/acs.oprd.1c00038

[66] Palkowitz M. D., Emmanuel M. A., Oderinde M. S. et al. A paradigm shift in catalysis: electro- and photomediated nickel-catalyzed cross-coupling reactions. *Accounts of Chemical Research*. 2023. Vol. 56, No. 20. P. 2851–2865. DOI: 10.1021/acs.accounts.3c00479

[67] Singh P. P., Singh J., Srivastava V. Visible-light acridinium-based organophotoredox catalysis in late-stage synthetic applications. *RSC Advances*. 2023. Vol. 13, No. 16. P. 10958–10986. DOI: 10.1039/d3ra01364b

[68] Dolcini L. et al. Bifunctional photocatalysts display proximity-enhanced catalytic activity in metallaphotoredox C–O coupling. *ACS Catalysis*. 2024. Vol. 14, No. 24. P. 18651–18659. DOI: 10.1021/acscatal.4c05893

[69] Shi X. et al. Enhanced three-component chloro-/azido-fluoroalkylation of unactivated alkenes via the proximity effect in a heterogeneous metallaphotocatalyst. *ACS Catalysis*. 2025. Vol. 15, No. 3. P. 2180–2191. DOI: 10.1021/acscatal.4c06960

order to improve its photophysical properties in the photocatalytic production of hydrogen peroxide, hydrogen, the oxidation of biomolecules, and a variety of organic transformations[70]. At the same time, the concept of photocharged carbon nitride received considerable attention. In these systems, graphitic carbon nitride is capable of storing photogenerated charge and subsequently utilizing the accumulated charge to promote catalytic reactions even after irradiation has ceased. In parallel, elemental sulfur (S_8) was shown to be a more selective oxidant than molecular oxygen and an efficient sulfur source for the sulfurization of organic compounds. Since carbon nitride is a heterogeneous photocatalyst, its separation from the reaction mixture is straightforward, providing an additional practical advantage[71].

Thus, the modern development of photoredox catalysis is increasingly directed not only toward the discovery of new photocatalysts but also toward the construction of integrated catalytic systems, in which the photosensitizer and the transition-metal complex function as a single molecular or material architecture. Such an approach provides new opportunities for controlling electron-transfer processes, reaction selectivity, and catalytic efficiency, and represents one of the principal directions of contemporary photocatalytic chemistry (Figure 7).

4. Development of Mesityl-Acridinium Photosensitizers in Photocatalysis

Photocatalysis is based on the ability of a photosensitizer to absorb light, reach an excited state, and undergo single-electron transfer (SET). The rate and efficiency of this process determine whether a given catalyst is suitable for a particular photochemical transformation.

The theoretical basis of electron-transfer reactions was established by Rudolph A. Marcus in 1956[72]. According to the Marcus theory, the rate of electron transfer depends not only on the thermodynamic driving force of the reaction (ΔG, Gibbs free energy), but also on the reorganization energy (λ), which reflects the structural rearrangement of both the reacting molecules and their solvent shells accompanying electron transfer. The maximum electron-transfer rate is achieved when the driving force is close to the reorganization energy. In other words, when the reaction becomes excessively exergonic (i.e., ΔG becomes much more negative than λ), the rate of electron transfer decreases

[70] Zheng Y., Liang X., Qu J., Zhang Y., Liu Y., Li Y., Guo X. Crystal phase engineering of carbon nitride: Advances in regulation strategies and photocatalytic applications. *Chemistry – A European Journal*. 2025. Vol. 31. Art. e02011. DOI: 10.1002/chem.202502011

[71] Wang C., Zhuang J., Savateev O. Organic synthesis mediated by carbon nitride photocatalysis and photocharged carbon nitrides. *Accounts of Chemical Research*. 2026. Vol. 59, No. 2. P. 246–257. DOI: 10.1021/acs.accounts.5c00687

[72] Marcus R. A. On the theory of oxidation-reduction reactions involving electron transfer. I. *The Journal of Chemical Physics.* 1956. Vol. 24, No. 5. P. 966–978. DOI: 10.1063/1.1742723

rather than increases. For the development of this theory, Marcus was awarded the 1992 Nobel Prize in Chemistry[73].

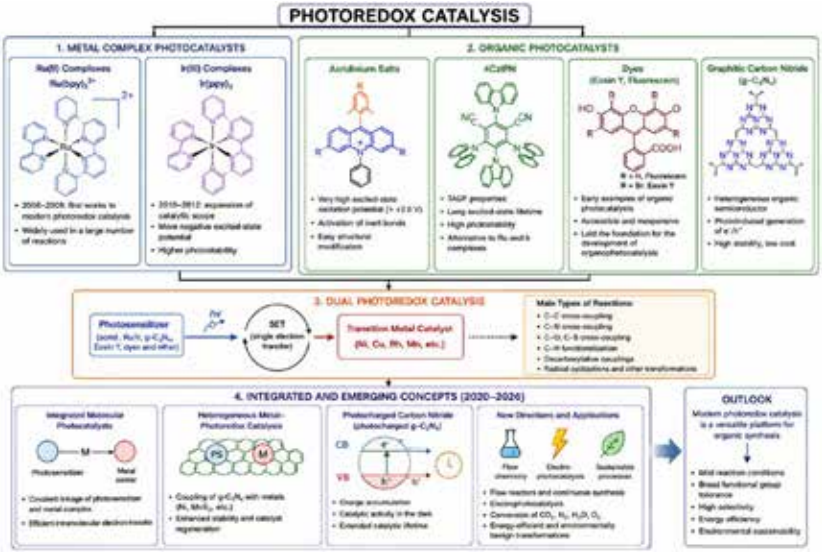


Fig. 7. Modern Photoredox Catalyst

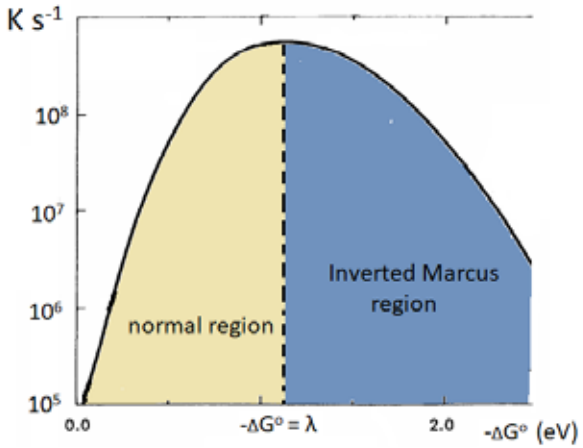


Fig. 8. Electron Transfer Rate in the Normal and Inverted Marcus Regions

[73] The Nobel Prize in Chemistry 1992. NobelPrize.org. Nobel Prize Outreach. 2026. Available at: https://www.nobelprize.org/prizes/chemistry/1992/summary/ (accessed 29.07.2026).

In photoredox catalysis, the electron-transfer ability of a photocatalyst is generally evaluated from its oxidation and reduction potentials, which describe its photooxidizing and photoreducing power after photoexcitation. For this reason, the literature usually reports two sets of electrochemical data, namely E_{ox} and E_{red}, together with the corresponding excited-state potentials E^*_{ox} and E^*_{red}, which are directly used to predict the feasibility of a given photoredox process.

On the basis of the Marcus theory, Fukuzumi described the kinetics of back electron transfer (BET) from the photoinduced charge-separated state [Mes•⁺–Acr•] to the ground-state species [(Mes–Acr)⁺] (Equation 1). Upon photoexcitation, the charge-separated state [Mes•⁺–Acr•] is formed with a quantum yield of approximately 98%. The energy of this state was found to be 2.37 eV (−0.49 − +1.88 eV), which is nearly five times greater than that of the charge-separated state found in the natural photosynthetic reaction center (approximately 0.50 eV). At 203 K, the lifetime of the charge-separated state reached two hours, representing one of the longest-lived artificial donor–acceptor systems reported at that time.

$$\ln(k_{BET}T^{-1}) = \ln\left(\frac{k_B}{h}\right) - \frac{(\Delta G^0_{BET} + \lambda)^2}{4\lambda k_B T}$$

Equation 1

The reorganization energy, λ, consists of two contributions: an external and an internal component. In solution, the external contribution corresponds to the energy required for solvent reorganization around the molecule, whereas the internal contribution reflects structural changes within the molecule itself, including variations in bond lengths and bond angles.

Based on these considerations, Fukuzumi designed the 9-mesityl-10-methylacridinium system in such a way that the mesityl group remains nearly perpendicular (approximately 90°) to the acridinium ring. As a consequence, the molecular geometry changes very little upon photoexcitation, leading to a remarkably small reorganization energy. At the same time, the molecule retains a large energy difference between its oxidized and reduced states, resulting in a very high excited-state redox potential.

An important consequence of this molecular design is that photoexcitation occurs within the normal Marcus region, whereas the back electron-transfer process takes place in the Marcus inverted region. Under these conditions, the larger the difference between the driving force and the reorganization energy, the slower the back electron transfer becomes, thereby substantially increasing the lifetime of the excited charge-separated state.

This concept became the fundamental principle underlying the molecular design of acridinium-based photosensitizers and enabled the preparation of photocatalysts possessing exceptionally long-lived excited states.

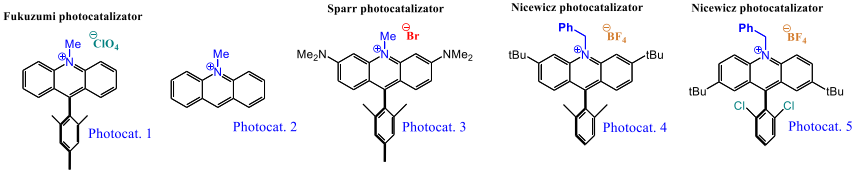


Table 1

Photophysical Properties of Selected Widely Used Photosensitizers[74, 75, 76]

PC	λ abs, nm	τ,ns	$E_{1/2}(P^*/P^-)$, V
Photocat. 1 (MesAcr$^+$Me)	430	6–10	+2.08
Photocat. 2 (Acr$^+$Me)		34 – 37	+2.32
Photocat. 3	503	2.2	+1.25
Photocat. 4	422	23.7	+2.13
Photocat. 5	--------	25.7	+2.20
4CzIPN	435	Pf-18.7, df-1390[a]	+1.35
$[Ir(dF(CF_3)ppy)_2(dtbbpy)]PF_6$	380	2300	+1.21
$[Ru(bpy)_3](PF_6)_2$	452	1100	+0.77
Eosin Y	520	S-2.1, T-160000[b]	+0.83
Rose Bengal	558	S-2.38, T-2400[c]	+0.81

a) For 4CzIPN, values are given for prompt fluorescence and delayed fluorescence.
b) S – measured in methanol; T – measured in H_2O.
c) Measured in 10^{-4} M NaOH solution saturated with air

Despite their considerably shorter excited-state lifetimes compared with Ru and Ir complexes, organic photocatalysts exhibit comparable catalytic activity in many reactions owing to their significantly higher excited-state oxidation potentials (Table 1).

5. Synthesis of N-Alkyl and N-Aryl Acridinium Salts

At present, the Reaxys database contains approximately 2,500 reported syntheses of N-alkyl and N-aryl acridinium salts, of which about 500 compounds

[74] Zilate B., Fischer C., Sparr C. Design and application of aminoacridinium organophotoredox catalysts. *Chemical Communications*. 2020. Vol. 56, No. 12. P. 1767–1775. DOI: 10.1039/C9CC08524F

[75] Bryden M. A., Zysman-Colman E. Organic thermally activated delayed fluorescence (TADF) compounds used in photocatalysis. *Chemical Society Reviews*. 2021. Vol. 50, No. 13. P. 7587–7680. DOI: 10.1039/d1cs00198a

[76] White A. R., Wang L., Nicewicz D. A. Synthesis and characterization of acridinium dyes for photoredox catalysis. *Synlett*. 2019. Vol. 30, No. 7. P. 827–832. DOI: 10.1055/s-0037-1611744

have been commercialized. Among these, 90 are tetrafluoroborate derivatives, and 24 are commercially available compounds. Derivatives of N-methylamines have frequently been employed as starting materials, with approximately 130 reported examples (Figure 9).

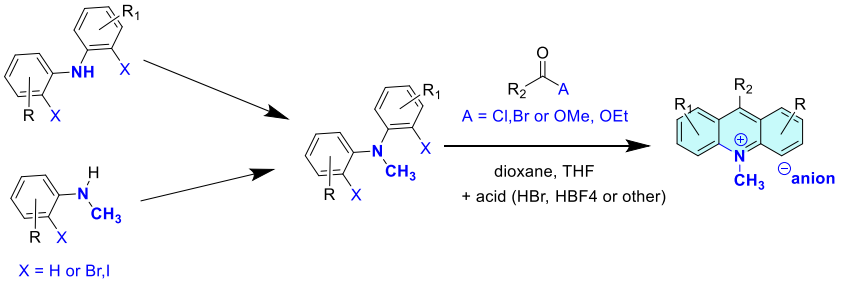


Fig. 9. Synthesis of Methylacridinium Salts from Methylamines

N-Methylacridones (approximately 218 examples) have also been widely used as starting materials. Another common synthetic approach involves N-alkylation using alkylating agents, for which approximately 1,100 examples have been reported (Figure 10).

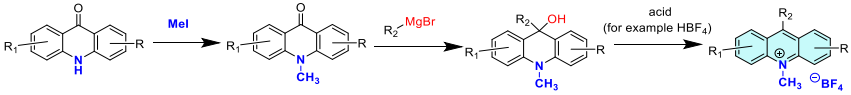


Fig. 10. Synthesis of Methylacridinium Salt Derivatives from Acridones

A convenient modern synthetic method is based on the condensation of xanthylium salts with amines. The corresponding xanthylium derivatives were described in the work of Nicewicz[52] (Figure 11).

These reactions are, in fact, an extension of the classical studies of Alan Katritzky, who, in the late 1970s and early 1980s, demonstrated that pyrylium salts could be converted into the corresponding pyridinium salts by condensation with amines[77].

Several examples of acridinium-containing coordination systems have also been reported. The first studies on the coordination chemistry of acridinium derivatives appeared in the late 1980s[78] and were later reproduced and further

[77] Katritzky A. R., Marson C. M. Pyrylium mediated transformations of primary amino groups into other functional groups. New synthetic methods. *Angewandte Chemie International Edition*. 1984. Vol. 23, No. 6. P. 420–429. DOI: 10.1002/anie.198404201

[78] Jonker S. A., Ariese F., Verhoeven J. W. Cation complexation with functionalized 9-arylacridinium ions: possible applications in the development of cation-selective optical probes. *Recueil des Travaux Chimiques des Pays-Bas*. 1989. Vol. 108. P. 109–115. DOI: 10.1002/recl.19891080307

developed in more recent publications[79]. However, the vast majority of these investigations were devoted to the photo-physical properties of the resulting systems, whereas their application in photoredox catalysis has remained largely unexplored. An interesting synthetic example is represented by bis-acridinium derivatives, which have mainly been investigated because of their ability to induce oxidative stress and to destroy malignant cells[80].

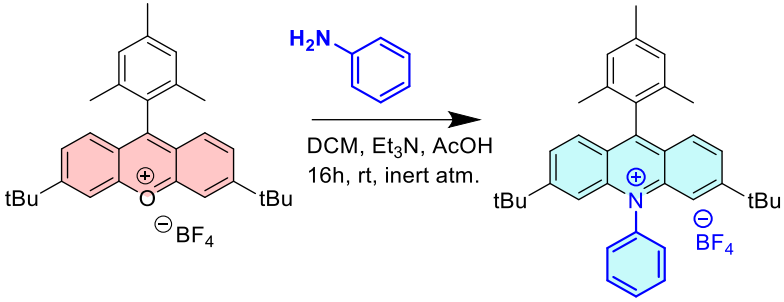


Fig. 11. Synthesis of Acridinium Salts from Xanthylium Salts (according to Nicewicz)

6. Potential Application of the New Acridinium Photocatalyst

Analysis of the literature and the Reaxys database has shown that a large number of N-methyl, N-aryl, and other N-alkyl acridinium salts have been described. In contrast, no examples of N-propyl acridinium salts were found in the Reaxys database. This observation prompted the synthesis of an N-propyl acridinium salt and the investigation of its physicochemical properties as a new representative of this class of compounds.

Because of the considerable synthetic potential of acridinium photocatalysts and our own interest in this field, we decided to prepare a new N-alkyl acridinium photocatalyst.

The designed compound represents a homolog of the Fukuzumi catalyst containing a longer alkyl substituent, which may influence the overall electronic properties of the molecule.

The proposed photocatalyst is expected to participate in organophotoredox reactions similar to those describe for related acridinium salts.

---

[79] del Giacco T., Carlotti B., De Solis S., Barbafina A., Elisei F. Steady-state and time-resolved investigations of a crown thioether conjugated with methylacridinium and its complexes with metal ions. *Physical Chemistry Chemical Physics*. 2011. Vol. 13. P. 2188–2195. DOI: 10.1039/c0cp01411g

[80] US2008119492A1. [Compositions and methods for treating cancer and other diseases characterized by abnormal cell proliferation]. 2008. Available at: https://worldwide.espacenet.com/patent/search/family/039417684/publication/US2008119492A1?q=pn%3DUS2008119492

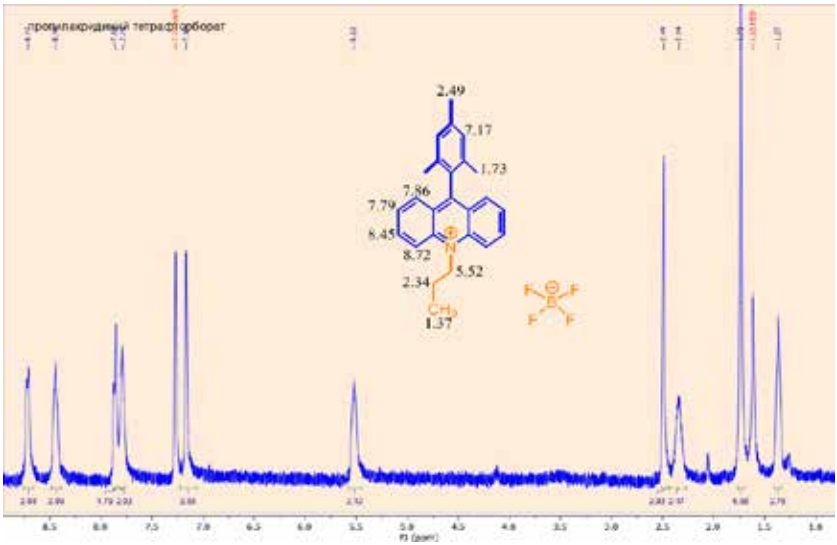


Fig. 12. ^{1}H NMR spectra of 9-mesityl-10-propylacridinium tetrafluoroborate in CDCl^{3}

^{1}H NMR (400 MHz, cdcl$_3$) δ 8.72 (br, 2H, acr-H^{1},H^{8}), 8.45 (br, 2H, acr-H^{2},H^{7}), 7.86 (br, 2H, acr-H^{4},H^{5}), 7.79 (br, 2H, acr-H^{3},H^{6}), 7.17 (s, 2H, mes^{CH}), 5.52 (br, 2H, Pr$^{N\text{-}CH2}$), 2.49 (s, 3H, mes^{CH3}), 2.34 (br, 2H, Pr^{CH2}), 1.73(s, 6H, mes^{CH3}), 1.37 (br, 3H,Pr^{CH3}).

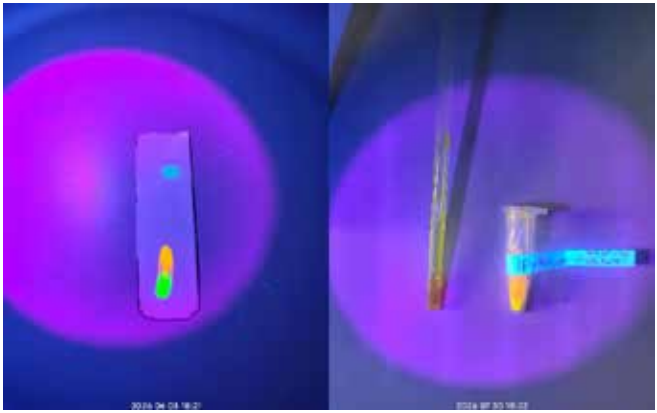


Fig. 13. Experimental photographs: (a) reaction mixture TLC in EtoAc 100%; (b) isolated sample; (c) sample prepared for NMR analysis

For example, the present photocatalyst may be applied to decarboxylative arylation reactions analogous to those catalyzed by 9-mesityl-10-methylacridinium salts (Figure 14), which provide an attractive alternative to conventional cross-coupling methods[81].

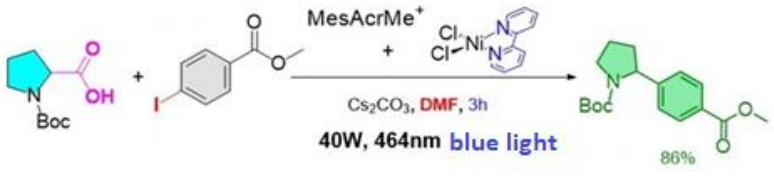


Fig. 14. Decarboxylative Arylation Mediated by Mes-Acr^{+}Me

The high redox potential of acridinium salts also makes them suitable for oxidative aromatization of heterocyclic compounds. One example is the oxidation of the indoline ring to the corresponding indole, a transformation employed during the synthesis of the antiviral drug Elbasvir[82] (Figure 15a). This reaction represents the final aromatization step of a heterocyclic framework prepared through a multistep synthetic sequence and illustrates a practical application of acridinium photocatalysts in organic synthesis. In this case, the transformation leads to the formation of Elbasvir, a pharmaceutical agent used in the treatment of hepatitis C virus infection.

Cyclization reactions constitute another important field of application. Under visible-light irradiation, photocatalysts, including acridinium salts[58], promote a variety of cycloaddition processes. Among these, [3+2] cycloaddition between alkenes and aromatic substrates has attracted particular attention. In this transformation the acridinium photocatalyst[83] replaces the previously employed ruthenium complex while maintaining high reaction efficiency. Such methodology provides convenient access to dihydrobenzofuran derivatives, structural motifs frequently encountered in biologically active compounds and pharmaceutical intermediates (Figure 15b).

The combination of transition-metal complexes with metal-based photosensitizers has been extensively developed in the pioneering studies of Molander and MacMillan. Their catalytic systems promoted the coupling of aryl

[81] Fischer C., Sparr C. Direkte Umwandlung von Estern in heterocyclische Fluorophore. *Angewandte Chemie International Edition*. 2017. Vol. 130, No. 9. P. 2461–2465. DOI: 10.1002/anie.201711296

[82] Yayla H. G. et al. Discovery and mechanistic study of a photocatalytic indoline dehydrogenation for the synthesis of elbasvir. *Chemical Science*. 2016. Vol. 7, No. 3. P. 2066–2073. DOI: 10.1039/C5SC03350K

[83] Blum T. R., Zhu Y., Nordeen S. A., Yoon T. P. Photocatalytic synthesis of dihydrobenzofurans by oxidative [3+2] cycloaddition of phenols. *Angewandte Chemie International Edition*. 2014. Vol. 53, No. 41. P. 11056–11059. DOI: 10.1002/anie.201406393

halides with α-amino acids or secondary amines[84], as well as amidoarylation[85] reactions (Figure 16).

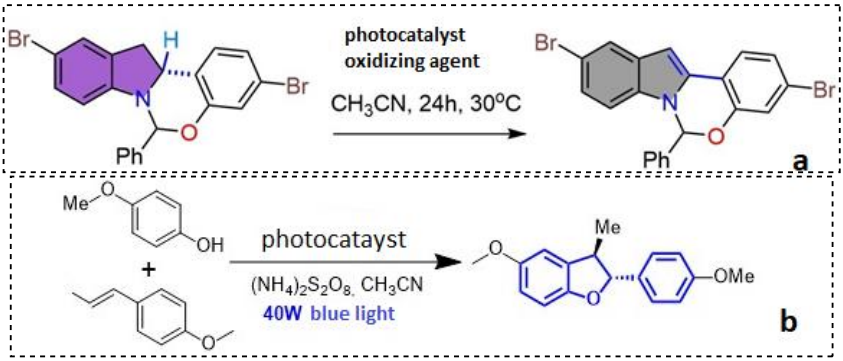


Fig. 15. One of the Key Steps in the Synthesis of Elbasvir and Photoinduced [3+2] Cycloaddition in the Synthesis of Dihydrobenzofuran

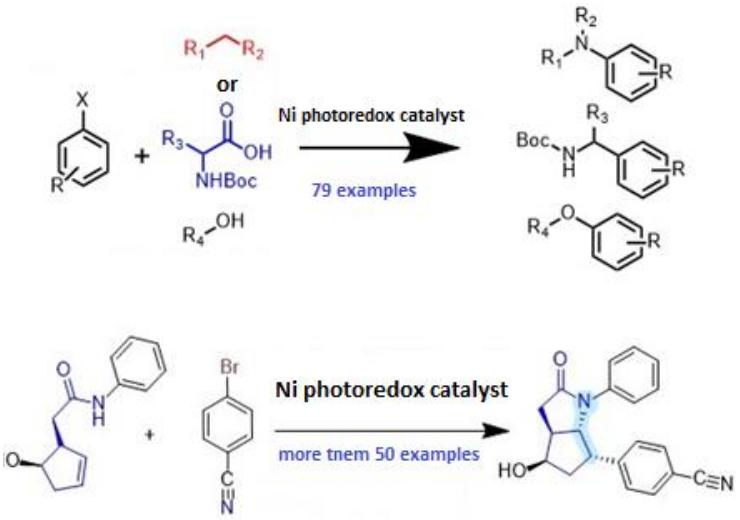


Fig. 16. Nickel-Catalyzed Photocatalytic Amidoarylation

[84] Marchi M. et al. The nickel age in synthetic dual photocatalysis: A bright trip toward materials science. *ChemSusChem*. 2022. Vol. 15, No. 18. DOI: 10.1002/cssc.202201094

[85] Zheng S., Gutiérrez-Bonet Á., Molander G. A. Merging photoredox PCET with Ni-catalyzed cross-coupling: Cascade amidoarylation of unactivated olefins. *Chem*. 2019. Vol. 5, No. 2. P. 339–352. DOI: 10.1016/j.chempr.2018.11.014

Another classical example of modern photoredox catalysis is represented by the Minisci reaction, which enables the direct functionalization of electron-deficient heteroarenes under mild conditions[86,87].

CONCLUSIONS

Over the past decades, photoredox catalysis has become one of the leading fields of modern chemistry. The development of this area has been driven by studies of electron-transfer mechanisms, the design of new photocatalysts, and the expansion of their practical applications.

A special role in the development of organic photoredox catalysis belongs to the work of Shunichi Fukuzumi, who established the foundations for the use of acridinium photosensitizers, formulated the principles of their molecular design, and demonstrated the possibility of efficiently controlling photoinduced electron-transfer processes. The subsequent development of this field led to the emergence of new organic photocatalysts, dual photoredox catalysis, and integrated photocatalytic systems.

The literature analysis conducted in this work demonstrated the considerable potential of acridinium salts as organic photocatalysts. Based on the analysis of modern synthetic approaches, an N-propylacridinium photocatalyst was synthesized, which may potentially be applied in organic photoredox catalysis and in further studies of photoactive systems.

SUMMARY

This monograph summarizes the development of photoredox catalysis from the earliest photochemical systems to modern organic photocatalysts. The main stages in the evolution of the field are discussed, with particular attention given to the contribution of Shunichi Fukuzumi to the development of acridinium-based photosensitizers and the principles of their molecular design. The development of transition metal, organic, and dual photoredox catalysis, as well as current trends in integrated photocatalytic systems, is analyzed. The principal synthetic approaches to N-alkyl and N-aryl acridinium salts are reviewed. Based on the literature analysis, a new N-propylacridinium salt was synthesized, and its potential application in photoredox catalysis was considered. The presented results may be useful for further research in organic photoredox catalysis and the development of new photoactive systems.

---

[86] Sun A., McAtee R., McClain E., Stephenson C. Advancements in visible-light-enabled radical C(sp2)–H alkylation of (hetero)arenes. *Synthesis.* 2019. Vol. 51, No. 5. P. 1063–1072. DOI: 10.1055/s-0037-1611658

[87] Jin J., MacMillan D. W. C. Direct α-arylation of ethers through the combination of photoredox-mediated C–H functionalization and the Minisci reaction. *Angewandte Chemie*. 2015. Vol. 127, No. 5. P. 1585–1589. DOI: 10.1002/ange.201410432

The following figure illustrates the historical and chemical development described in this monograph (Figure 17).

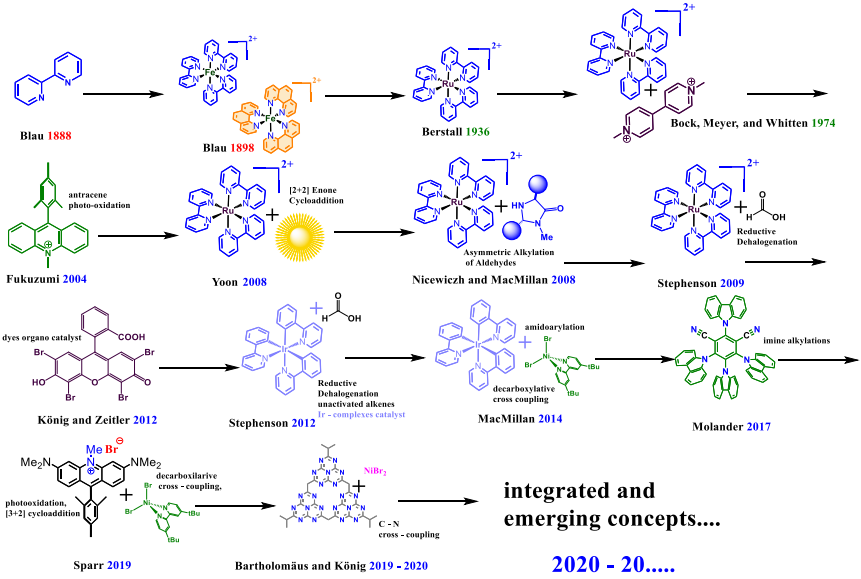


Fig. 17. The historical and chemical development of photoredox catalysis

Bibliography

1. Fritz Blau. Die Destillation pyridinmonocarbonsaurer Salze. *Berichte der Deutschen Chemischen Gesellschaft*. 1888. Vol. 21. P. 1077–1078. DOI: 10.1002/cber.188802101201

2. Weidel H., Russo M. Studien über das Pyridin. *Monatshefte für Chemie*. 1882. Vol. 3. P. 850–885. DOI: 10.1007/BF01516855

3. Anderson T. Ueber die Producte der trockenen Destillation thierischer Materien. *Annalen der Chemie und Pharmacie*. 1870. Vol. 154. P. 270–286. DOI: 10.1002/jlac.18701540303

4. Heuser A., Stoehr C. Ueber methylirte Dipyridyle; II. Abhandlung. *Journal für Praktische Chemie*. 1891. Vol. 44. P. 404–410. DOI: 10.1002/prac.18910440133

5. Blau F. Über neue organische Metallverbindungen. *Monatshefte für Chemie*. 1898. Vol. 19. P. 647–689. DOI: 10.1007/BF01517438

6. Pirani M. Fritz Blau. *Naturwissenschaften*. 1930. Vol. 18. P. 97–101. DOI: 10.1007/BF01493015

7. Constable E. C., Housecroft C. E. The Early Years of 2,2'-Bipyridine – A Ligand in Its Own Lifetime. *Molecules*. 2019. Vol. 24, No. 21. Art. 3951. DOI: 10.3390/molecules24213951

8. Burstall F. H. Optical activity dependent on coordinated bivalent ruthenium. *Journal of the Chemical Society*. 1936. P. 173–175. DOI: 10.1039/JR9360000173

9. Morgan G., Burstall F. H. Researches on residual affinity and co-ordination. Part XXXVII. Complex metallic salts containing 2:6-di-2′-pyridylpyridine (2:2′:2″-tripyridyl). *Journal of the Chemical Society*. 1937. P. 1649–1655. DOI: 10.1039/JR9370001649

10. Paris J. P., Brandt W. W. Charge transfer luminescence of a ruthenium(II) chelate. *Journal of the American Chemical Society*. 1959. Vol. 81, No. 18. P. 5001–5002. DOI: 10.1021/ja01527a064

11. Crosby G. A., Demas J. N. Quantum efficiencies on transition metal complexes. II. Charge-transfer luminescence. *Journal of the American Chemical Society*. 1971. Vol. 93, No. 12. P. 2841–2847. DOI: 10.1021/ja00741a003

12. Crosby G. A., Demas J. N. Measurement of photoluminescence quantum yields. *Journal of Chemical Education*. 1971. Vol. 75, No. 8. P. 991–1024. DOI: 10.1021/j100678a001

13. Klassen D. M. Spectroscopic Studies of Ruthenium(II) Complexes. Assignment of the Luminescence. *The Journal of Chemical Physics*. 1968. Vol. 48, No. 4. P. 1853–1858. DOI: 10.1063/1.1668922

14. Crosby G. A., Perkins W. G., Klassen D. M. Luminescence from Transition-Metal Complexes: Tris(2,2′-bipyridine)- and Tris(1,10-phenanthroline)Ruthenium(II). *The Journal of Chemical Physics.* 1965. Vol. 43, No. 5. P. 1498–1503. DOI: 10.1063/1.1696960

15. Palmer R. A., Piper T. S. 2,2′-Bipyridine Complexes. I. Polarized Crystal Spectra of Tris(2,2′-bipyridine)copper(II), -nickel(II), -cobalt(II), -iron(II), and -ruthenium(II). *Inorganic Chemistry*. 1966. Vol. 5, No. 5. P. 864–878. DOI: 10.1021/ic50039a034

16. Harrigan R. W. Symmetry assignments of the lowest CT excited states of ruthenium(II) complexes via a proposed electronic coupling model. *The Journal of Chemical Physics*. 1973. Vol. 59, No. 7. P. 3468– 3476. DOI: 10.1063/1.1680504

17. Gafney H. D., Adamson A. W. Excited state $Ru(bipyr)3^{2+}$ as an electron-transfer reductant. *Journal of the American Chemical Society*. 1972. Vol. 94, No. 23. P. 8238–8239. DOI: 10.1021/ja00778a054

18. Fujishima A., Honda K. Electrochemical photolysis of water at a semiconductor electrode. *Nature*. 1972. Vol. 238. P. 37–38. DOI: 10.1038/238037a0

19. Bock C. R., Meyer T. J., Whitten D. G. Electron transfer quenching of the luminescent excited state of tris(2,2′-bipyridine)ruthenium(II). Flash photolysis relaxation technique for measuring the rates of very rapid electron transfer reactions. *Journal of the American Chemical Society*. 1974. Vol. 96, No. 14. P. 4710–4712. DOI: 10.1021/ja00821a078

20. Lehn J.-M., Sauvage J.-P. Chemical storage of light energy: Catalytic generation of hydrogen by visible light or sunlight irradiation of neutral aqueous solutions. *Nouveau Journal de Chimie*. 1977. Vol. 1. No. 14. P. 449–451.

21. Kirch M., Lehn J.-M., Sauvage J.-P. Hydrogen generation by visible light irradiation of aqueous solutions of metal complexes. An approach to the photochemical conversion and storage of solar energy. *Helvetica Chimica Acta.* 1979. Vol. 62, No. 4. P. 1345–1384. DOI: 10.1002/hlca.19790620449

22. Kalyanasundaram K., Kiwi J., Grätzel M. Hydrogen evolution from water by visible light, a homogeneous three component test system for redox catalysis. *Helvetica Chimica Acta*. 1978. Vol. 61. P. 2720–2730. DOI: 10.1002/hlca.19780610740

23. Kiwi J., Grätzel M. Hydrogen evolution from water induced by visible light mediated by redox catalysis. *Nature*. 1979. Vol. 281. P. 657–658. DOI: 10.1038/281657a0

24. Hedstrand D. M., Kruizinga W. H., Kellogg R. M. Light induced and dye accelerated reductions of phenacyl onium salts by 1,4-dihydropyridines. *Tetrahedron Letters*. 1978. Vol. 19, No. 14. P. 1255–1258. DOI: 10.1016/S0040-4039(01)94515-0

25. Pac C., Ihama M., Yasuda M., Miyauchi Y., Sakurai H. Tris(2,2′-bipyridine)ruthenium(2+)-mediated photoreduction of olefins with 1-benzyl-1,4-dihydronicotinamide: a mechanistic probe for electron-transfer reactions of NAD(P)H-model compounds. *Journal of the American Chemical Society*. 1981. Vol. 103, No. 21. P. 6495–6497. DOI: 10.1021/ja00411a040

26. Cano-Yelo H., Deronzier A. Photo-oxidation of some carbinols by the Ru(II) polypyridyl complex-aryl diazonium salt system. *Tetrahedron Letters*. 1984. Vol. 25, No. 48. P. 5517–5520. DOI: 10.1016/S0040-4039(01)81614-2

27. Cano-Yelo H., Deronzier A. Photocatalysis of the Pschorr reaction by tris-(2,2′-bipyridyl)ruthenium(II) in the phenanthrene series. *Journal of the Chemical Society, Perkin Transactions 2*. 1984. Vol. 13, No. 6. P. 1093–1098. DOI: 10.1039/P29840001093

28. Balzani V., Moggi L., Scandola F. Towards a supramolecular photochemistry: Assembly of molecular components to obtain photochemical molecular devices. In: Supramolecular Photochemistry. Dordrecht: Reidel Publishing Company, 1987. P. 1–28. DOI: 10.1007/978-94-009-3979-0_1

29. Collin J.-P., Guillerez S., Sauvage J.-P., Barigelletti F., De Cola L., Flamigni L., Balzani V. Photoinduced processes in dyads and triads containing a ruthenium(II)-bis(terpyridine) photosensitizer covalently linked to electron donor and acceptor groups. *Inorganic Chemistry*. 1991. Vol. 30, No. 22. P. 4230–4238. DOI: 10.1021/ic00022a026

30. Balzani V., Credi A., Venturi M. Photochemistry and photophysics of coordination compounds: An extended view. *Coordination Chemistry Reviews*. 1998. Vol. 171. P. 3–16. DOI: 10.1016/S0010-8545(98)90005-4

31. Fukuzumi S. Catalysis on electron transfer and the mechanistic insight into redox reactions. *Bulletin of the Chemical Society of Japan*. 1997. Vol. 70, No. 1. P. 1–28. DOI: 10.1246/bcsj.70.1

32. Patz M., Fukuzumi S. Electron transfer in organic reactions. *Journal of Physical Organic Chemistry.* 1997. Vol. 10, No. 3. P. 129–137. DOI: 10.1002/(SICI)1099-1395(199703)10:3<129::AID-POC884>3.0.CO;2-4

33. Itoh S., Taniguchi M., Takada N., Nagatomo S., Kitagawa T., Fukuzumi S. Effects of metal ions on the electronic, redox, and catalytic properties of cofactor TTQ of quinoprotein amine dehydrogenases. *Journal of the American Chemical Society*. 2000. Vol. 122. P. 12087–12097. DOI: 10.1021/ja0020207

34. Fukuzumi S., Itoh S. Catalytic control of redox reactivities of coenzyme analogs by metal ions. *Antioxidants & Redox Signaling*. 2001. Vol. 3, No. 5. P. 807–824. DOI: 10.1089/15230860152664993

35. Imahori H., Guldi D. M., Tamaki K., Yoshida Y., Luo C., Sakata Y., Fukuzumi S. Charge separation in a novel artificial photosynthetic reaction center lives 380 ms. *Journal of the American Chemical Society*. 2001. Vol. 123, No. 27. P. 6617–6628. DOI: 10.1021/ja004123v

36. Fukuzumi S., Kotani H., Ohkubo K., Ogo S., Tkachenko N. V., Lemmetyinen H. Electron-transfer state of 9-mesityl-10-methylacridinium ion with a much longer lifetime and higher energy than that of the natural photosynthetic reaction center. *Journal of the American Chemical Society*. 2004. Vol. 126, No. 6. P. 1600–1601. DOI: 10.1021/ja038656q

37. Kotani H., Ohkubo K., Fukuzumi S. Photocatalytic oxygenation of anthracenes and olefins with dioxygen via selective radical coupling using 9-mesityl-10-methylacridinium ion as an effective electron-transfer photocatalyst. *Journal of the American Chemical Society*. 2004. Vol. 126, No. 49. P. 15999–16006. DOI: 10.1021/ja048353b

38. Fukuzumi S. Artificial photosynthetic systems for production of hydrogen. *Current Opinion in Chemical Biology*. 2015. Vol. 25. P. 18–26. DOI: 10.1016/j.cbpa.2014.12.008

39. Fukuzumi S. Artificial photosynthesis for production of hydrogen peroxide and its fuel cells. *Biochimica et Biophysica Acta*. 2016. Vol. 1857, No. 5. P. 604–611. DOI: 10.1016/j.bbabio.2015.08.012

40. Ischay M. A., Anzovino M. E., Du J., Yoon T. P. Efficient visible light photocatalysis of [2+2] enone cycloadditions. *Journal of the American Chemical Society*. 2008. Vol. 130, No. 39. P. 12886–12887. DOI: 10.1021/ja805387f

41. Nicewicz D. A., MacMillan D. W. C. Merging photoredox catalysis with organocatalysis: the direct asymmetric alkylation of aldehydes. *Science*. 2008. Vol. 322. P. 77–80. DOI: 10.1126/science.1161976

42. Narayanam J. M. R., Tucker J. W., Stephenson C. R. J. Electron-transfer photoredox catalysis: development of a tin-free reductive dehalogenation reaction. *Journal of the American Chemical Society*. 2009. Vol. 131, No. 25. P. 8756–8757. DOI: 10.1021/ja9033582

43. Narayanam J. M. R., Stephenson C. R. J. Visible light photoredox catalysis: applications in organic synthesis. *Chemical Society Reviews*. 2011. Vol. 40, No. 1. P. 102–113. DOI: 10.1039/B913880N

44. Pham P. V., Nagib D. A., MacMillan D. W. C. Photoredox catalysis: a mild, operationally simple approach to the synthesis of α-trifluoromethyl carbonyl compounds. *Angewandte Chemie International Edition*. 2011. Vol. 50. P. 6119–6122. DOI: 10.1002/anie.201101861

45. King K. A., Spellane P. J., Watts R. J. Excited-state properties of a triply ortho-metalated iridium(III) complex. *Journal of the American Chemical Society*. 1985. Vol. 107, No. 5. P. 1431–1432. DOI: 10.1021/ja00291a064

46. Nguyen J., D'Amato E., Narayanam J. et al. Engaging unactivated alkyl, alkenyl and aryl iodides in visible-light-mediated free radical reactions. *Nature Chemistry.* 2012. Vol. 4. P. 854–859. DOI: 10.1038/nchem.1452

47. Condie A. G., Gonzalez-Gomez J. C., Stephenson C. R. J. Visible-light photoredox catalysis: aza-Henry reactions via C–H functionalization. *Journal of the American Chemical Society*. 2010. Vol. 132, No. 5. P. 1464–1465. DOI: 10.1021/ja909145y

48. Neumann M., Füldner S., König B., Zeitler K. Metal-free, cooperative asymmetric organophotoredox catalysis with visible light. *Angewandte Chemie International Edition*. 2011. Vol. 50, No. 4. P. 951–954. DOI: 10.1002/anie.201002992

49. Uoyama H., Goushi K., Shizu K., Nomura H., Adachi C. Highly efficient organic light-emitting diodes from delayed fluorescence. *Nature*. 2012. Vol. 492, No. 7428. P. 234–238. DOI: 10.1038/nature11687

50. Nicewicz D. A., Nguyen T. M. Recent applications of organic dyes as photoredox catalysts in organic synthesis. *ACS Catalysis*. 2014. Vol. 4, No. 1. P. 355–360. DOI: 10.1021/cs400956a

51. Romero N. A., Nicewicz D. A. Mechanistic insight into the photoredox catalysis of anti-Markovnikov alkene hydrofunctionalization reactions. *Journal of the American Chemical Society*. 2014. Vol. 136, No. 49. P. 17024–17035. DOI: 10.1021/ja506228u

52. Zuo Z. et al. Merging photoredox with nickel catalysis: Coupling of α-carboxyl sp3-carbons with aryl halides. *Science*. 2014. Vol. 345. P. 437–440. DOI: 10.1126/science.1255525

53. Skubi K. L., Blum T. R., Yoon T. P. Dual catalysis strategies in photochemical synthesis. *Chemical Reviews*. 2016. Vol. 116, No. 17. P. 10035–10074. DOI: 10.1021/acs.chemrev.6b00018

54. Romero N. A., Nicewicz D. A. Organic photoredox catalysis. *Chemical Reviews*. 2016. Vol. 116, No. 17. P. 10075–10166. DOI: 10.1021/acs.chemrev.6b00057

55. Patel N. R., Kelly C. B., Siegenfeld A. P., Molander G. A. Mild, redox-neutral alkylation of imines enabled by an organic photocatalyst. *ACS Catalysis*. 2017. Vol. 7. P. 1766–1770. DOI: 10.1021/acscatal.6b03665

56. König B. Photocatalysis in organic synthesis – past, present, and future. *European Journal of Organic Chemistry*. 2017. P. 1979–1981. DOI: 10.1002/ejoc.201700420

57. Huang H., Li X., Yu C., Zhang Y., Mariano P. S., Wang W. Visible-light-promoted nickel- and organic-dye-cocatalyzed formylation reaction of aryl halides and triflates and vinyl bromides with diethoxyacetic acid as a formyl equivalent. *Angewandte Chemie International Edition*. 2017. Vol. 56, No. 6. P. 1500–1505. DOI: 10.1002/anie.201610108

58. Politano F., Oksdath-Mansilla G. Light on the horizon: current research and future perspectives in flow photochemistry. *Organic Process Research & Development.* 2018. Vol. 22. P. 1045–1062. DOI: 10.1021/acs.oprd.8b00213

59. Fu M., Xiao Y., Qian X., Zhao D., Xu Y. A design concept of long-wavelength fluorescent analogs of rhodamine dyes: replacement of oxygen with silicon atom. *Chemical Communications.* 2008. No. 15. P. 1780–1782. DOI: 10.1039/B718544H

60. Grimm J. B., Klein T., Kopek B. G., Shtengel G., Hess H. F., Sauer M., Lavis L. D. Synthesis of a far-red photoactivatable silicon-containing rhodamine for super-resolution microscopy. *Angewandte Chemie International Edition.* 2016. Vol. 55, No. 5. P. 1723–1727. DOI: 10.1002/anie.201509649

61. Fischer C., Kerzig C., Zilate B., Wenger O. S., Sparr C. Modulation of acridinium organophotoredox catalysts guided by photophysical studies. *ACS Catalysis*. 2020. Vol. 10, No. 1. P. 210–215 DOI: 10.1021/acscatal.9b03606

62. Ghosh I., Khamrai J., Savateev A., Shlapakov N., Antonietti M., König B. Organic semiconductor photocatalyst can bifunctionalize arenes and

heteroarenes. *Science*. 2019. Vol. 365, No. 6451. P. 360–366. DOI: 10.1126/science.aaw3254

63. Gisbertz S., Reischauer S., Pieber B. Overcoming limitations in dual photoredox/nickel-catalysed C–N cross-couplings due to catalyst deactivation. *Nature Catalysis*. 2020. Vol. 3, P. 611–620. DOI: 10.1038/s41929-020-0473-6

64. Kim J., Kim D., Chang S. Merging two functions in a single Rh catalyst system: Bimodular conjugate for light-induced oxidative coupling. *Journal of the American Chemical Society*. 2020. Vol. 142, No. 45. P. 19052–19057. DOI: 10.1021/jacs.0c09982

65. Yan H., Zhu S., Xu H.-C. Integrating continuous-flow electrochemistry and photochemistry for the synthesis of acridinium photocatalysts via site-selective C–H alkylation. *Organic Process Research & Development.* 2021. Vol. 25, No. 12. P. 2608–2613. DOI: 10.1021/acs.oprd.1c00038

66. Palkowitz M. D., Emmanuel M. A., Oderinde M. S. et al. A paradigm shift in catalysis: electro- and photomediated nickel-catalyzed cross-coupling reactions. *Accounts of Chemical Research*. 2023. Vol. 56, No. 20. P. 2851–2865. DOI: 10.1021/acs.accounts.3c00479

67. Singh P. P., Singh J., Srivastava V. Visible-light acridinium-based organophotoredox catalysis in late-stage synthetic applications. *RSC Advances*. 2023. Vol. 13, No. 16. P. 10958–10986. DOI: 10.1039/d3ra01364b

68. Dolcini L. et al. Bifunctional photocatalysts display proximity-enhanced catalytic activity in metallaphotoredox C–O coupling. *ACS Catalysis*. 2024. Vol. 14, No. 24. P. 18651–18659. DOI: 10.1021/acscatal.4c05893

69. Shi X. et al. Enhanced three-component chloro-/azido-fluoroalkylation of unactivated alkenes via the proximity effect in a heterogeneous metallaphotocatalyst. *ACS Catalysis*. 2025. Vol. 15, No. 3. P. 2180–2191. DOI: 10.1021/acscatal.4c06960

70. Zheng Y., Liang X., Qu J., Zhang Y., Liu Y., Li Y., Guo X. Crystal phase engineering of carbon nitride: Advances in regulation strategies and photocatalytic applications. *Chemistry – A European Journal*. 2025. Vol. 31. Art. e02011. DOI: 10.1002/chem.202502011

71. Wang C., Zhuang J., Savateev O. Organic synthesis mediated by carbon nitride photocatalysis and photocharged carbon nitrides. *Accounts of Chemical Research*. 2026. Vol. 59, No. 2. P. 246–257. DOI: 10.1021/acs.accounts.5c00687

72. Marcus R. A. On the theory of oxidation-reduction reactions involving electron transfer. I. *The Journal of Chemical Physics*. 1956. Vol. 24, No. 5. P. 966–978. DOI: 10.1063/1.1742723

73. The Nobel Prize in Chemistry 1992. NobelPrize.org. Nobel Prize Outreach. 2026. Available at: https://www.nobelprize.org/prizes/chemistry/1992/summary/ (accessed 29.07.2026).

74. Zilate B., Fischer C., Sparr C. Design and application of aminoacridinium organophotoredox catalysts. *Chemical Communications.* 2020. Vol. 56, No. 12. P. 1767–1775. DOI: 10.1039/C9CC08524F.

75. Bryden M. A., Zysman-Colman E. Organic thermally activated delayed fluorescence (TADF) compounds used in photocatalysis. *Chemical Society Reviews.* 2021. Vol. 50, No. 13. P. 7587–7680. DOI: 10.1039/d1cs00198a

76. White A. R., Wang L., Nicewicz D. A. Synthesis and characterization of acridinium dyes for photoredox catalysis. *Synlett*. 2019. Vol. 30, No. 7. P. 827–832. DOI: 10.1055/s-0037-1611744

77. Katritzky A. R., Marson C. M. Pyrylium mediated transformations of primary amino groups into other functional groups. New synthetic methods. *Angewandte Chemie International Edition*. 1984. Vol. 23, No. 6. P. 420–429. DOI: 10.1002/anie.198404201

78. Jonker S. A., Ariese F., Verhoeven J. W. Cation complexation with functionalized 9-arylacridinium ions: possible applications in the development of cation-selective optical probes. *Recueil des Travaux Chimiques des Pays-Bas*. 1989. Vol. 108. P. 109–115. DOI: 10.1002/recl.19891080307

79. del Giacco T., Carlotti B., De Solis S., Barbafina A., Elisei F. Steady-state and time-resolved investigations of a crown thioether conjugated with methylacridinium and its complexes with metal ions. *Physical Chemistry Chemical Physics*. 2011. Vol. 13. P. 2188–2195. DOI: 10.1039/c0cp01411g

80. US2008119492A1. [Compositions and methods for treating cancer and other diseases characterized by abnormal cell proliferation]. 2008. Available at: https://worldwide.espacenet.com/patent/search/family/039417684/publication/US2008119492A1?q=pn%3DUS2008119492

81. Fischer C., Sparr C. Direkte Umwandlung von Estern in heterocyclische Fluorophore. *Angewandte Chemie International Edition*. 2017. Vol. 130, No. 9. P. 2461–2465. DOI: 10.1002/anie.201711296

82. Yayla H. G. et al. Discovery and mechanistic study of a photocatalytic indoline dehydrogenation for the synthesis of elbasvir. *Chemical Science*. 2016. Vol. 7, No. 3. P. 2066–2073. DOI: 10.1039/C5SC03350K

83. Blum T. R., Zhu Y., Nordeen S. A., Yoon T. P. Photocatalytic synthesis of dihydrobenzofurans by oxidative [3+2] cycloaddition of phenols. *Angewandte Chemie International Edition.* 2014. Vol. 53, No. 41. P. 11056–11059. DOI: 10.1002/anie.201406393

84. Marchi M. et al. The nickel age in synthetic dual photocatalysis: A bright trip toward materials science. *ChemSusChem.* 2022. Vol. 15, No. 18. DOI: 10.1002/cssc.202201094

85. Zheng S., Gutiérrez-Bonet Á., Molander G. A. Merging photoredox PCET with Ni-catalyzed cross-coupling: Cascade amidoarylation of

unactivated olefins. *Chem.* 2019. Vol. 5, No. 2. P. 339–352. DOI: 10.1016/j.chempr.2018.11.014

86. Sun A., McAtee R., McClain E., Stephenson C. Advancements in visible-light-enabled radical C(sp2)–H alkylation of (hetero)arenes. *Synthesis*. 2019. Vol. 51, No. 5. P. 1063–1072. DOI: 10.1055/s-0037-1611658

87. Jin J., MacMillan D. W. C. Direct α-arylation of ethers through the combination of photoredox-mediated C–H functionalization and the Minisci reaction. *Angewandte Chemie*. 2015. Vol. 127, No. 5. P. 1585–1589. DOI: 10.1002/ange.201410432

Information about the authors:
Bahirov Elvir,
Postgraduate Student
Taras Shevchenko National University of Kyiv
60, Volodymyrska Street, Kyiv, Ukraine

Lampeka Rostyslav,
Doctor of Chemical Sciences, Professor,
Head of the Department of Inorganic Chemistry
Taras Shevchenko National University of Kyiv
60, Volodymyrska Street, Kyiv, Ukraine

CHAPTER 23

DIFFUSION-ORDERED NMR SPECTROSCOPY (DOSY) IN THE ANALYSIS OF MULTICOMPONENT MIXTURES

Hreben Mariia, Lampeka Rostyslav
DOI https://doi.org/10.30525/978-9934-26-714-7-23

INTRODUCTION

Modern analytical chemistry and physicochemical studies of solutions increasingly face the challenge of analysing complex multicomponent mixtures. Traditional approaches based on hyphenated separation techniques (liquid chromatography, gas chromatography, capillary electrophoresis) followed by detection suffer from several significant limitations[1]. First, they require lengthy and often labor-intensive sample preparation (extraction, derivatization, preconcentration). Second, the native structure of the sample is destroyed, making it impossible to study labile systems that exist in a state of dynamic equilibrium (for example, coordination compounds with high rates of ligand exchange or processes associated with the migration of heavy metal ions in natural waters or soils)[2].

Nuclear Magnetic Resonance (NMR) spectroscopy is a recognized leader among non-destructive analytical methods. However, when studying real-world objects (petrochemical fractions, biological fluids, food products, or extraction mixtures), one-dimensional spectra are characterized by severe signal overlap. Multidimensional NMR spectroscopy (COSY, HSQC, HMBC) solves the signal resolution problem by correlating chemical shifts through bonds; however, it cannot distinguish signals from different molecules if their chemical structures are similar or if they are mixed in a single solution[3].

An elegant and powerful solution to this problem came with Diffusion-Ordered Spectroscopy (DOSY NMR), first proposed by Johnson and

[1] Holzgrabe U. Quantitative NMR spectroscopy in pharmaceutical applications. *Progress in Nuclear Magnetic Resonance Spectroscopy.* 2010. Vol. 57. № 2. P. 229–240. DOI: https://doi.org/10.1016/j.pnmrs.2010.05.001.

[2] Johnson C. S. Jr. Diffusion ordered nuclear magnetic resonance spectroscopy: principles and applications. *Progress in Nuclear Magnetic Resonance Spectroscopy.* 1999. Vol. 34, № 3–4. P. 203–256. DOI: https://doi.org/10.1016/S0079-6565(99)00003-5.

[3] Claridge T. D. W. High-Resolution NMR Techniques in Organic Chemistry. 3rd ed. Elsevier, 2016. 464 p. URL: https://www.inspectioncopy.elsevier.com/book/details/9780080999869.

co-workers[4]. DOSY introduces a fundamentally new dimension to NMR methodology – the translational self-diffusion coefficient (D) – effectively turning the spectrometer into a "virtual chromatograph". On a two-dimensional DOSY plot, the horizontal axis displays the classical chemical shift (spectral structural data), while the vertical axis represents the diffusion coefficient (physical data related to molecular size and shape)[5].

The primary analytical capabilities and advantages of DOSY NMR include:

– Virtual Mixture Separation: Signals from different chemical species present in the same solution are separated onto distinct levels along the vertical axis, provided their molecular weights or hydrodynamic sizes differ by at least 10–15%.

– Non-destructiveness: Analysis is performed directly in the NMR tube without adding chemical reagents or sorbents, ensuring the preservation of thermodynamic equilibria[6].

– Determination of Molecular Weights and Sizes: By utilizing fundamental physical relationships, experimental D values allow for the calculation of the hydrodynamic radius of molecules or nanoparticles, as well as the estimation of their molecular weight via calibration curves[7].

– Investigation of Intermolecular Interactions: The method is highly sensitive to association, aggregation, solvation, and complexation processes.

If a small molecule binds to a large macromolecule or a heavy metal ion, its diffusion rate drops sharply, which is immediately reflected in the DOSY spectrum[8].

Due to these unique properties, the DOSY method has become an indispensable tool in fields such as food quality control (detection of adulteration in olive oil and honey), medical diagnostics (blood plasma metabolomics), polymer chemistry, and modern coordination and environmental chemistry[9].

---

[4] [4]Morris K. F., Johnson C. S. Jr. Diffusion-ordered two-dimensional nuclear magnetic resonance spectroscopy. *Journal of the American Chemical Society*. 1992. Vol. 114. № 8. P. 3650–3657. DOI: https://doi.org/10.1021/ja00034a071.

[5] Barjat H. et al. High-resolution diffusion-ordered 2D spectroscopy (HR-DOSY). *Journal of Magnetic Resonance, Series B*. 1995. Vol. 108. № 3. P. 266–272. DOI: http://apps.isiknowledge.com/UA_GeneralSearch_input.do?product=UA&search_mode=GeneralSearchWOS:A1995RN49300008.

[6] Johnson C. S. Jr. Diffusion ordered nuclear magnetic resonance spectroscopy: principles and applications. *Progress in Nuclear Magnetic Resonance Spectroscopy*. 1999. Vol. 34, № 3–4. P. 203–256. DOI: https://doi.org/10.1016/S0079-6565(99)00003-5.

[7] Barjat H. et al. High-resolution diffusion-ordered 2D spectroscopy (HR-DOSY). *Journal of Magnetic Resonance, Series B*. 1995. Vol. 108. № 3. P. 266–272. DOI: http://apps.isiknowledge.com/UA_GeneralSearch_input.do?product=UA&search_mode=GeneralSearchWOS:A1995RN49300008.

[8] Macchioni A. et al. Determining accurate molecular sizes in solution through NMR diffusion measurements. *Chemical Society Reviews*. 2008. Vol. 37, № 3. P. 479–489. DOI: https://doi.org/10.1039/b615067p.

[9] Pregosin P. S. NMR diffusion methods in inorganic and organometallic chemistry. Spectroscopic Properties of Inorganic and Organometallic Compounds. *Royal Society of Chemistry*, 2011. Vol. 42. P. 248–268. DOI: https://doi.org/10.1039/9781849732833-00248.

1. Practical Applications of DOSY in the Analysis of Complex Systems

1.1. Oils: Olive Oil as a Case Study (Lipid Matrices)

Extra Virgin Olive Oil (EVOO) is a high-value commodity on the global market whose quality is strictly regulated. The primary chemical components of the oil are triglycerides (TAGs >95%), composed predominantly of oleic, linoleic, and palmitic acid residues. A common form of adulteration involves diluting EVOO with cheaper refined vegetable oils (such as sunflower, soybean, corn, or rapeseed oils).

Because TAGs from different vegetable oils feature identical glycerol backbones and similar fatty acid chains, their signals in NMR spectra overlap heavily in the regions of glycerol protons (4.1–4.3 ppm) and aliphatic chains (0.8–2.4 ppm). However, using DOSY makes it possible to differentiate these components based on subtle differences in their self-diffusion coefficients, which stem from varying degrees of unsaturation (number of double bonds) and the specific micro-viscosity of the lipid environment[10].

Furthermore, DOSY NMR enables direct visualization of minor olive oil components (squalene, tocopherols, sterols), which have significantly lower molecular weights (300–400 g/mol). Thanks to their substantially higher diffusion molecular weights (300–400 g/mol). Thanks to their substantially higher diffusion coefficients, the peaks of these minor components form a distinct, high-diffusion layer on the 2D plot, allowing for their quantitative analysis without prior saponification of the oil.

1.2. Natural Honey (Carbohydrate Matrices)

Natural honey is an extremely concentrated aqueous carbohydrate solution (up to 80–85% dry matter), where the main components are the monosaccharides D-fructose and D-glucose existing in tautomeric equilibrium. The primary challenge in the NMR analysis of honey is the presence of hundreds of severely overlapping multiplet signals from CH-ring protons within a narrow chemical shift window ranging from 3.2 to 4.5 ppm[11].

To resolve this issue, modern modifications of the technique – such as Pure Shift DOSY (e.g., based on the PSYCHE pulse sequence) – are employed[12]. This approach completely eliminates homonuclear spin-spin coupling, converting complex multiplets into sharp, individual singlets.

---

[10] Dais P., Hatzakis E. Quality assessment and authentication of virgin olive oil by NMR spectroscopy: A critical review. *Analytica Chimica Acta*. 2013. Vol. 765. P. 1–27. DOI: https://doi.org/10.1016/j.aca.2012.12.003.

[11] Dinca O. R. et al. Geographical and botanical origin discrimination of Romanian honey using complex stable isotope data and chemometrics. *Food Analytical Methods*. 2015. Vol. 8. № 2. P. 401–412. DOI: https://doi.org/10.1007/s12161-014-9903-x.

[12] Foroozandeh M. et al. Ultrahigh-Resolution Diffusion-Ordered Spectroscopy. *Angewandte Chemie International Edition*. 2016. Vol. 55. № 50. P. 15579–15582. DOI: https://doi.org/10.1002/anie.201609676.

On a Pure Shift DOSY 2D plot, carbohydrate signals are clearly stratified according to their degree of polymerization: monosaccharides (fructose, glucose) possess the highest D values, disaccharides (sucrose, maltose) occupy an intermediate position, and trisaccharides (melezitose, raffinose) shift toward lower diffusion coefficients.

This allows for the straightforward detection of added artificial invert or starch syrups containing high-molecular-weight oligosaccharides (dextrins), which exhibit abnormally low diffusion rates[13].

1.3. Coordination Chemistry and Metal Complexes

In modern organometallic and coordination chemistry, DOSY NMR serves as an indispensable tool for resolving solution speciation, identifying dynamic aggregation behaviour, and evaluating metal–ligand complexation parameters without disturbing delicate chemical equilibria.

Solution Speciation in Transition Metal Complexes

The determination of exact solution structures for transition metal complexes is often hampered by rapid ligand exchange, dynamic equilibria between multiple species (e.g., monomer–dimer or neutral–ionic equilibria), and severe NMR signal overlap. DOSY NMR directly addresses these challenges by correlating chemical shifts with hydrodynamic volume.

For instance, in nickel(II) coordination chemistry, DOSY was pivotal in establishing speciation trends for 2-substituted vs. 2.9-disubstituted phenanthroline-Ni(II) complexes[14]. By measuring self-diffusion coefficients (D), researchers can unambiguously discriminate between mononuclear complexes, halogen-bridged dimeric species, and free uncoordinated ligands in solution. The spatial steric bulk at the 2.9-positions directly dictates whether a complex remains strictly monomeric or undergoes concentration-dependent self-association, a distinction easily tracked via step-changes in measured D values.

Similarly, DOSY NMR proves crucial in soft-matter photocatalytic systems. In studies evaluating cobalt-catalyzed photo transformations within aqueous micellar environments[15], DOSY tracks the partition and compartmentation of cobalt catalysts and organic substrates inside surfactant micelles (e.g., SDS or Triton X-100). Because a free catalyst diffuses rapidly compared to a massive surfactant micelle, measuring the reduction in D upon adding micellar media

[13] Dinca O. R. et al. Geographical and botanical origin discrimination of Romanian honey using complex stable isotope data and chemometrics. *Food Analytical Methods*. 2015. Vol. 8. № 2. P. 401–412. DOI: https://doi.org/10.1007/s12161-014-9903-x.

[14] Mateos-Calbet A. et al. 2-Substituted vs 2,9-Disubstituted Phenanthroline-Ni(II)-halides: Speciation Control and Structural Elucidation in Solution. *Inorganic Chemistry*. 2025. Vol. 64. № 34. P. 17093–17097. DOI: https://doi.org/10.1021/acs.inorgchem.5c02704.

[15] Serebrennikova O. O. et al. Aqueous micellar environment impacts the Co-catalyzed phototransformation: A case study. ACS Catalysis. 2025. Vol. 15. № 3. P. 1820–1831. DOI: https://doi.org/10.1021/acscatal.4c05678.

quantifies the binding affinity of the metal complex to the micellar core vs. the bulk aqueous phase.

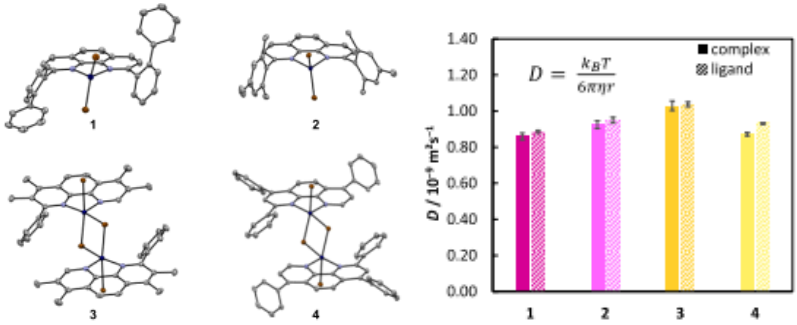


Fig. 1. Solid state and solution behavior of complexes 1−4 (red-Br, blue-Ni). (A) sc-XRD structures of complexes 1−4 (thermal ellipsoids at 50% probability) (E) Diffusion coefficients of complexes 1−4 and their free ligands in $CDCl_3$ solution, as determined by DOSY NMR[14]

Discrimination of Mononuclear and Binuclear Uranyl (UO_2^{2+}) Complexes

The study of uranyl (UO_2^{2+}) coordination chemistry in solution is critically important for designing selective extractants, nuclear waste sorbents, and functional photoluminescent materials. The linear dioxo uranyl cation coordinates ligands in its equatorial plane, frequently forming higher-order oligomers or hydroxo-/oxo-bridged complexes depending on the ligand geometry, stoichiometry, and pH.

In our recent work on novel hydroxyl-functionalized 1,2,4-triazole-based oligomers as uranyl chelators[16], 2D DOSY NMR played a decisive role in deciphering complex coordination behaviour. The nitrogen-rich triazole cores equipped with hydroxyl pendant groups present multiple binding sites capable of engaging uranyl ions in both 1:1 and 2:2 (or 2:1) binding modes.

Standard 1D NMR spectra of these reaction mixtures display broadened, highly complex multiplet patterns due to overlapping proton signals from distinct coordination species in solution. By applying DOSY NMR:

– *Unambiguous Speciation*: Mononuclear UO_2L^1, UO_2L^2, $UO_2(L^3)_2$ (or hydroxyl-bridged) complexes were clearly separated along the diffusion axis into distinct horizontal tracks.

[16] Khomenko D. M. et al. Novel hydroxyl-functionalized 1,2,4-triazole-based oligomers: synthetic approach, photoluminescence and coordination behaviour as uranyl chelators. *CrystEngComm.* 2026. Vol. 28. № 22. P. 3486–3498. DOI: https://doi.org/10.1039/D6CE00233A.

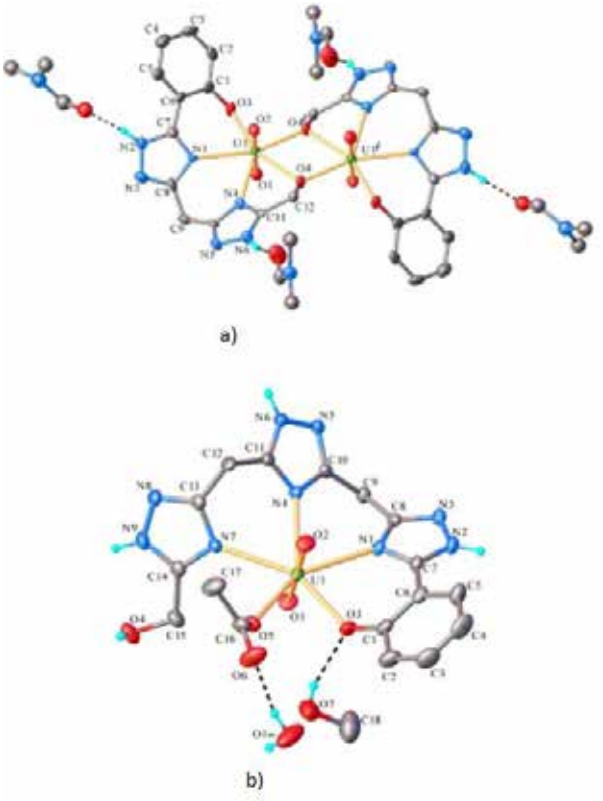


Fig. 2. Examples of complexes with different ratio between ligand and coordination atom a)1:1; b)1:2[17]

– *Hydrodynamic Volume Correlation:* Owing to the significant increase in molecular weight and effective hydrodynamic radius upon dimerization/ binuclear complex formation, the binuclear uranyl species exhibited systematically lower self-diffusion coefficients D(binuclear) compared to their mononuclear counterparts D(mononuclear).

– *Stoichiometric Determination:* Comparing the ratio of D values D(complex) / D (free ligand) against modified Stokes-Einstein estimations allowed for the explicit determination of the complex oligomeric state in

[17] Khomenko D. M. et al. Novel hydroxyl-functionalized 1,2,4-triazole-based oligomers: synthetic approach, photoluminescence and coordination behaviour as uranyl chelators. *CrystEngComm*. 2026. Vol. 28. № 22. P. 3486–3498. DOI: https://doi.org/10.1039/D6CE00233A.

solution without relying on single-crystal X-ray diffraction, which may not always represent the predominant liquid-phase species.

If the ligand exchange rate is slow on the NMR time scale, two isolated diffusion layers are simultaneously observed on the DOSY spectrum, allowing for the precise determination of the complex stoichiometry[18]. In the case of fast chemical exchange, a single time-averaged ligand signal is observed; its position along the diffusion axis allows for the calculation of thermodynamic stability constants and the determination of the degree of uranyl polymerization in aqueous phases[19].

1.4. Pharmaceutical Analysis and Quality Control

In modern pharmacy, DOSY NMR serves as a rapid method for detecting counterfeit and falsified products without destroying the commercial formulation of the drug. For example, analysing tablet formulations of erectile dysfunction medications or antibiotics makes it possible – in a single 15–20 minutes experiment–to identify the Active Pharmaceutical Ingredient (API), quantitatively evaluate excipients (fillers such as lactose, starch, magnesium stearate), and detect the presence of dangerous impurities or illegally added active substances. Because the API and excipients differ significantly in molecular weight, their signals on a 2D DOSY plot are clearly separated along the vertical axis, even when total overlap occurs in the methyl or aromatic regions of a standard 1D spectrum.

2. Environmental Science and Contaminant Dynamics

In environmental research, DOSY NMR has emerged as an indispensable non-destructive analytical method for dissecting complex environmental matrices–such as Natural Organic Matter (NOM), soil extracts, and aquatic sediments–and monitoring pollutants from molecular interactions to global carbon cycles.

– **Probing Natural Organic Matter (NOM) Supramolecular Structures:** NOM consists of polydisperse, heterogeneous mixtures of humic and fulvic acids. Standard 1D ^{1}H or ^{13}C spectra yield broad, featureless “humps” due to extreme spectral crowding. DOSY NMR separates these supramolecular aggregates along the diffusion dimension according to their hydrodynamic radii without altering non-covalent hydrophobic or electrostatic networks[20, 21].

---

[18] Khomenko D. M. et al. Novel hydroxyl-functionalized 1,2,4-triazole-based oligomers: synthetic approach, photoluminescence and coordination behaviour as uranyl chelators. *CrystEngComm*. 2026. Vol. 28. № 22. P. 3486–3498. DOI: https://doi.org/10.1039/D6CE00233A.

[19] Urbank C., Vondung L. Accurate Molecular Size Determination by Diffusion Ordered NMR Spectroscopy Based on an Improved Diffusion Model. *Chemistry – A European Journal*. 2026. Art. e71471. DOI: https://doi.org/10.1002/chem.71471.

[20] Zheng G., Price W. S. Direct hydrodynamic radius measurement on dissolved organic matter in natural waters using diffusion NMR. *Environmental Science & Technology*. 2012. Vol. 46. № 3. P. 1675–1680. DOI: https://doi.org/10.1021/es202809e.

[21] Simpson A. J., McNally D. J., Simpson M. J. NMR spectroscopy in environmental research: From molecular interactions to global processes. *Progress in Nuclear Magnetic Resonance Spectroscopy*. 2011. Vol. 58. № 3–4. P. 97–175. DOI: https://doi.org/10.1016/j.pnmrs.2010.09.001.

– **Contaminant–Matrix Interactions and Bioavailability:** DOSY is uniquely equipped to characterize non-covalent binding between organic pollutants (e.g., pesticides, pharmaceuticals, polycyclic aromatic hydrocarbons [PAHs], per and polyfluoroalkyl substances via ^{19}F-DOSY) and humic matrices[22]. When a small pollutant molecule binds to a high-molecular-weight NOM assembly, its observed diffusion coefficient drops sharply toward that of the NOM supramolecular host. Measuring this change provides quantitative thermodynamic data on binding constants, speciation, bioavailability, and mobility in soils and natural waters[23].

– **Identification of Organic Phosphorus Species in Soil Extracts:** Soil phosphorus composition directly governs ecosystem fertility and aquatic eutrophication. In alkaline soil extracts (NaOH-EDTA), ^{31}P NMR signal assignment is frequently hindered by severe peak overlap in the monoester region and chemical shift drift caused by variable pH and paramagnetic ions (Fe^{3+}, Mn^{2+}). Applying ^{31}P-DOSY NMR separates organic phosphorus compounds (such as *myo*- and *scyllo*-inositol hexakisphosphates, phosphonates, and nucleic acid fragments) based on their mobility, providing accurate peak identification in dense soil spectra[24].

3. Multidimensional 3D-DOSY Spectroscopy

While 2D DOSY is a powerful technique, it encounters significant limitations when dealing with ultra-complex mixtures where signals overlap severely in the chemical shift (F_1) domain species possess similar diffusion coefficients (D). When two overlapping peaks decay at slightly different rates, monoexponential decay fitting fails, producing severe mathematical artifacts or averaged diffusion values along the vertical axis.

To overcome this bottleneck, **3D-DOSY Spectroscopy** was developed by combining standard 2D correlation pulse sequences (e.g., COSY, TOCSY, HSQC, HMQC, NOESY, or 2DJ) with pulsed field gradient diffusion encoding.

Concatenated 3D-DOSY Experiments *(e.g., DOSY-COSY, DOSY-HSQC)*

– **Resolves Overlapping Signals:** The main advantage is the ability to accurately measure diffusion coefficients even when proton signals overlap heavily in standard 1D spectra.

[22] Gauthier J. R., Mabury S. A. Experimentally Determined Aqueous Diffusion Coefficients of PFAS Using 19F NMR Diffusion-Ordered Spectroscopy. *ACS EST Water*. 2024. Vol. 4. № 10. P. 4615–4624. DOI: https://doi.org/10.1021/acsestwater.4c00631.

[23] Mazzei P., Piccolo A. Quantitative Evaluation of Noncovalent Interactions between Glyphosate and Dissolved Humic Substances by NMR Spectroscopy. *Environmental Science & Technology*. 2012. Vol. 46. № 11. P. 5939–5946. DOI: https://doi.org/10.1021/es300265a.

[24] Mazzei P., Piccolo A. Quantitative Evaluation of Noncovalent Interactions between Glyphosate and Dissolved Humic Substances by NMR Spectroscopy. *Environmental Science & Technology.* 2012. Vol. 46. № 11. P. 5939–5946. DOI: https://doi.org/10.1021/es300265a.

– **Higher Structural Precision:** Dispersing signals across two frequency dimensions (^{1}H-^{1}H or ^{1}H-^{13}C) enables independent decay fitting for each cross-peak, ensuring precise component identification.

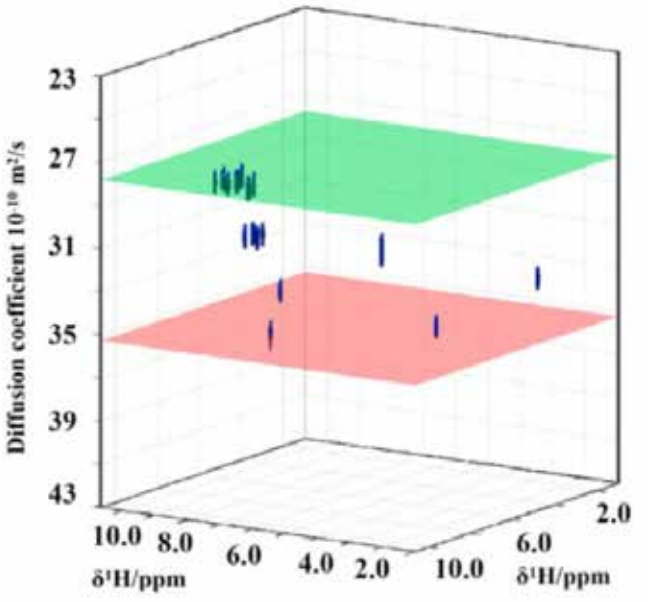


Fig. 3. Typical spectrum of 3D-DOSY-COSY of organic compounds in coal chemical wastewater[25]

Internally Encoded IDOSY Sequences (e.g., 2DJ-IDOSY, HSQC-IDOSY)

This strategy overcomes the signal loss and long acquisition times of conventional 3D experiments:

– **Doubles Sensitivity (S/N):** Embedding diffusion gradients into pre-existing delays (like TOCSY/NOESY mixing times) eliminates the 50% signal loss typical of standard pulse sequences.

– **Drastically Faster Acquisition:** Reduces experimental runtimes from several hours down to just a few minutes.

– **Greater Efficiency:** Minimizes overall sequence delays and simplifies phase cycling requirements.

[25] Ma H. et al. Utilizing 3D DOSY NMR in the characterization of organic compounds in coal chemical wastewater. *Magnetic Resonance Letters*. 2022. Vol. 2. № 2. Art. 100021. DOI: https://doi.org/10.1016/j.mrl.2021.100021.

4. Experimental Part

4.1. Materials and Methods

DOSY NMR experiments on honey and oil samples were performed on an 800 MHz Bruker Neo dual-purpose solid/liquid-state spectrometer at the University of Edinburgh, School of Chemistry, while the study of actinide complexes (in this case, uranyl) was carried out on a Bruker Avance NEO 400 MHz spectrometer in Kyiv.

Olive oil samples were analysed as solutions in $CDCl_3$. Honey samples were prepared by dissolving 50 mg of honey in 550 µl D_2O[26]. Uranyl complexes were studied in DMSO-d_6 under strict thermal control of the system at T = 298K[12]. To measure diffusion in oil and honey samples, the ledbpgp2s pulse sequence (Bruker stimulated echo with bipolar gradient pulses and longitudinal eddy current delay, LED) was used. The number of gradient steps was at least 16, with the gradient amplitude varying linearly from 5% to 95%. Optimal values for the gradient duration and diffusion time were adjusted individually for each system. For uranyl complexes, the stebpgp1s pulse sequence was employed, keeping all other acquisition parameters identical.

4.2. Results and Discussion

Mathematical processing and fitting of signal intensity decay curves were performed using Bruker TopSpin / Dynamics Center software.

A. Results of Olive Oil Analysis

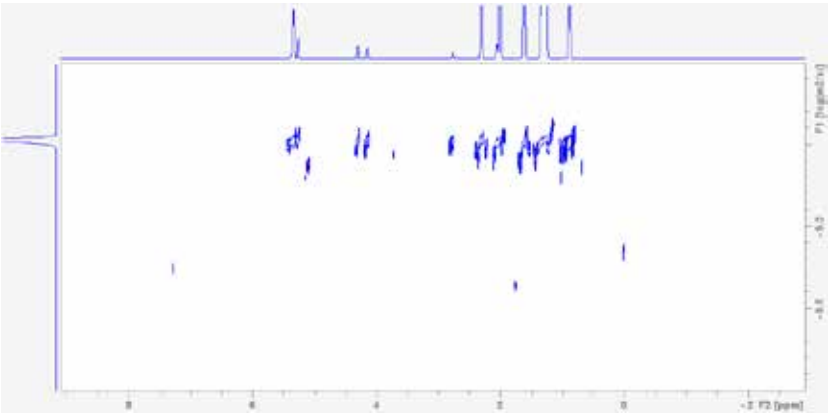


Fig. 4. Full 2D DOSY NMR spectrum of olive oil

[26] Gauthier J. R. et al. Exploring the Composition and Authenticity of Honey and Syrup Samples Using Quantitative NMR Spectroscopy and Principal Component Analysis in an Upper-Year Undergraduate Analytical Environmental Course. *Journal of Chemical Education*. 2023. Vol. 100. № 1. P. 161–169. DOI: https://doi.org/10.1021/acs.jchemed.2c00501.

In the presented 2D DOSY spectrum of olive oil, a clear separation between the main triglyceride lipid matrix and minor components (squalene) is observed. Upon artificial addition of an adulterant, the formation of additional tracks is detected; however, signal discrimination remains challenging. Following spectral processing with Dynamics Center, enhanced signal resolution is achieved.

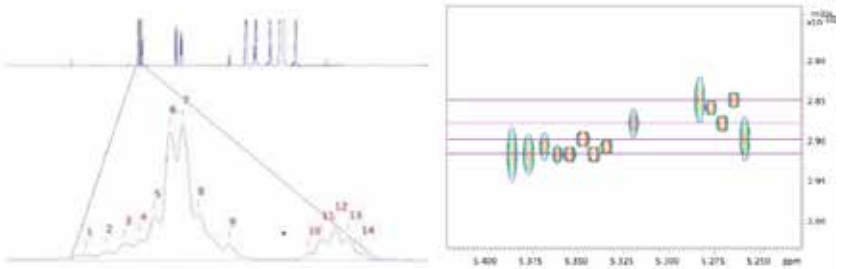


Fig. 5. Fragment of the report generated by Dynamics Center

In the Fig. 5 we see the zoom spectra of the same olive oil, as in Fig. 4. It can be seen that even severely overlapping signals can be resolved using DOSY NMR spectroscopy. We can see at least 4 compounds with different diffusion coefficients fig. 5 (right pic.).

B. Results of Honey Analysis

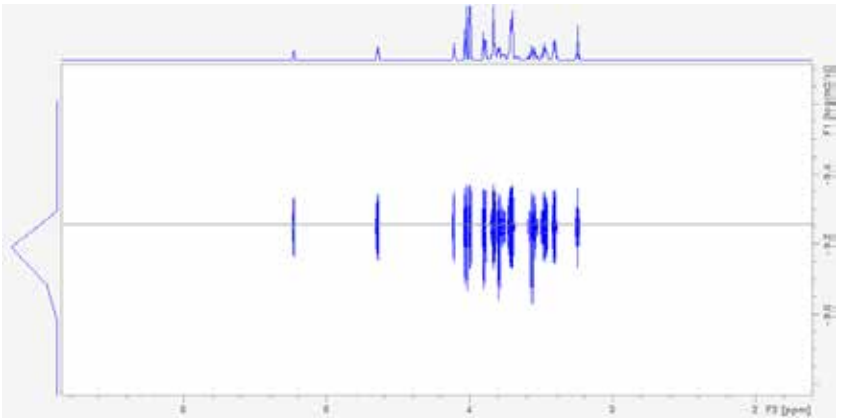


Fig. 6. DOSY NMR spectrum of floral honey

The spectrum demonstrates that resolving the primary components – such as glucose, fructose, and sucrose – is not feasible because these sugars (glucose and fructose) share the same molecular weight.

Consequently, the next stage of investigating these matrices will involve employing PSYCHE-iDOSY to enhance resolution.

C. Uranyl Coordination Compounds

To investigate uranyl complex systems, a series of DOSY NMR experiments was conducted with various ligands. The chemical formulas of these compounds are listed in fig. 7.

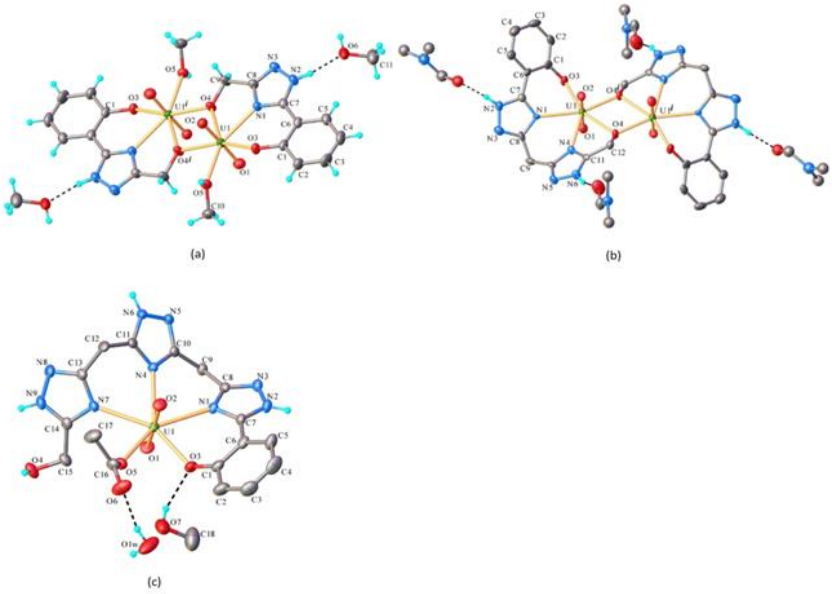


Fig. 7. Formulas of three complexes in solid state: a) $(UO_2)_2(L^1)_2$; b) $(UO_2)_2(L^2)_2$•4DMF; c) UO_2L^3 [27]

The resulting experimental spectra is presenting in Fig. 8, and the values for the self-diffusion coefficients of both coordinated species are summarized in Table 1.

[27] Khomenko D. M. et al. Novel hydroxyl-functionalized 1,2,4-triazole-based oligomers: synthetic approach, photoluminescence and coordination behaviour as uranyl chelators. *CrystEngComm*. 2026. Vol. 28. № 22. P. 3486–3498. DOI: https://doi.org/10.1039/D6CE00233A.

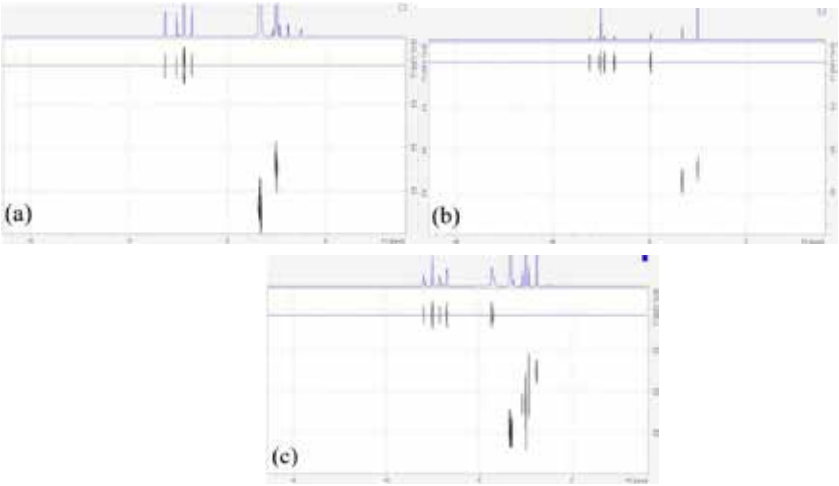


Fig. 8. ^{1}H DOSY NMR spectra of complexes in DMSO-d_6: (a) 1 ($((UO_2)_2(L^1)_2)$), C = 7.2 mM; (b) [2–4DMF] ($((UO_2)_2(L^2)_2)$), C = 6.1 mM and (c) 3 ((UO_2L^3)), C = 2.1 mM [28]

Table 1

Self-diffusion coefficients of H2L1–3 and their complexes 1–3 calculated using the DOSY signals of the molecular framework

Compound	Concentration, mM	D r
H_2L^1	33.02	3.22
H_2L^2	23.2	2,56
H_2L^3	21.4	1.97
1	7.2	2.03
[2•4DMF]	6.1	1.99
3	2.1	2.20
DMSO-d_6		6.63*
H_2O		7.78*

**independent on compound concentration.*

An analysis of Table 1 demonstrates that upon ligand coordination to the uranyl ion, the diffusion coefficient decreases. ^{1}H DOSY NMR studies of complexes 1–3 (Fig. 8, Table 1) revealed that the diffusion coefficients of

[28] Khomenko D. M. et al. Novel hydroxyl-functionalized 1,2,4-triazole-based oligomers: synthetic approach, photoluminescence and coordination behaviour as uranyl chelators. *CrystEngComm.* 2026. Vol. 28. № 22. P. 3486–3498. DOI: https://doi.org/10.1039/D6CE00233A.

compounds 1 and [2•4DMF] are, as expected, virtually identical (2.03×10^{-10} and 1.99×10^{-10} m^2 s^{-1}, respectively) and differ from that of complex 3 (2.20×10^{-10} m^2 s^{-1}). This fact is in good agreement with the dimeric structure of compounds 1 and 2 versus the more compact mononuclear structure of complex 3.

CONCLUSIONS

1. Two-dimensional Diffusion-Ordered NMR Spectroscopy (DOSY) is a highly efficient and versatile physical-chemical tool for analyzing complex liquid mixtures of various origins.

2. In the study of lipid and carbohydrate matrices (olive oil, honey), the capability of the DOSY method (particularly its Pure Shift modifications) to perform rapid quality and authenticity control without sample destruction or the use of harmful chemical reagents was demonstrated, fully aligning with the principles of green analytical chemistry.

3. In the field of actinide coordination chemistry, taking uranyl complexes as an example, measuring translational self-diffusion was proven to reliably identify the formation of complex species, determine their stoichiometry, and reveal their dynamic characteristics directly in the solution phase, bypassing the complicated stage of single-crystal isolation.

4. Future prospects for this direction lie in the implementation of Ultrafast DOSY pulse sequences, which enable the acquisition of diffusion maps in a single scan. This opens up unique opportunities for real-time monitoring of fast chemical reactions and liquid-liquid extraction kinetics.

SUMMARY

In modern chemical analysis and materials science, non-destructive molecular profiling and dynamic characterization of complex multicomponent liquid systems become increasingly relevant. This paper focuses on the comprehensive analysis of the current state and practical applications of two-dimensional Diffusion-Ordered NMR Spectroscopy (DOSY). The study outlines the theoretical foundations of the method, based on encoding the spatial position of nuclei using Pulsed Field Gradients (PGF). The concept of "virtual chromatography" is demonstrated across three distinct system classes: plant lipid matrices (olive oil), concentrated carbohydrate systems (natural honey), and coordination compounds. By measuring individual translational self-diffusion coefficients (D), this approach enables the simultaneous verification of food authenticity, detection of adulterants, and elucidation of labile complex stoichiometry, stability constants, and heavy metal oligomerization states in solution without prior physical separation.

ACKNOWLEDGEMENTS

We sincerely acknowledge the School of Chemistry at the University of Edinburgh for their financial support of our research. We express our thanks to Prof. Dušan Ugrin for his advice and assistance in recording NMR spectra.

Bibliography

1. Holzgrabe U. Quantitative NMR spectroscopy in pharmaceutical applications. *Progress in Nuclear Magnetic Resonance Spectroscopy.* 2010. Vol. 57. № 2. P. 229–240. DOI: https://doi.org/10.1016/j.pnmrs.2010.05.001.

2. Johnson C. S. Jr. Diffusion ordered nuclear magnetic resonance spectroscopy: principles and applications. *Progress in Nuclear Magnetic Resonance Spectroscopy*. 1999. Vol. 34, № 3–4. P. 203–256. DOI: https://doi.org/10.1016/S0079-6565(99)00003-5.

3. Claridge T. D. W. High-Resolution NMR Techniques in Organic Chemistry. 3rd ed. Elsevier, 2016. 464 p. URL: https://www.inspectioncopy.elsevier.com/book/details/9780080999869.

4. Morris K. F., Johnson C. S. Jr. Diffusion-ordered two-dimensional nuclear magnetic resonance spectroscopy. *Journal of the American Chemical Society*. 1992. Vol. 114. № 8. P. 3650–3657. DOI: https://doi.org/10.1021/ja00034a071.

5. Barjat H. et al. High-resolution diffusion-ordered 2D spectroscopy (HR-DOSY). *Journal of Magnetic Resonance, Series B*. 1995. Vol. 108. № 3. P. 266–272. DOI: http://apps.isiknowledge.com/UA_GeneralSearch_input.do?product=UA&search_mode=GeneralSearchWOS:A1995RN49300008.

6. Macchioni A. et al. Determining accurate molecular sizes in solution through NMR diffusion measurements. *Chemical Society Reviews*. 2008. Vol. 37, № 3. P. 479–489. DOI: https://doi.org/10.1039/b615067p.

7. Pregosin P. S. NMR diffusion methods in inorganic and organometallic chemistry. Spectroscopic Properties of Inorganic and Organometallic Compounds. *Royal Society of Chemistry*, 2011. Vol. 42. P. 248–268. DOI: https://doi.org/10.1039/9781849732833-00248.

8. Dais P., Hatzakis E. Quality assessment and authentication of virgin olive oil by NMR spectroscopy: A critical review. *Analytica Chimica Acta*. 2013. Vol. 765. P. 1–27. DOI: https://doi.org/10.1016/j.aca.2012.12.003.

9. Dinca O. R. et al. Geographical and botanical origin discrimination of Romanian honey using complex stable isotope data and chemometrics. *Food Analytical Methods*. 2015. Vol. 8. № 2. P. 401–412. DOI: https://doi.org/10.1007/s12161-014-9903-x.

10. Foroozandeh M. et al. Ultrahigh-Resolution Diffusion-Ordered Spectroscopy. *Angewandte Chemie International Edition*. 2016. Vol. 55. № 50. P. 15579–15582. DOI: https://doi.org/10.1002/anie.201609676.

11. Mateos-Calbet A. et al. 2-Substituted vs 2,9-Disubstituted Phenanthroline-Ni(II)-halides: Speciation Control and Structural Elucidation in Solution. *Inorganic Chemistry*. 2025. Vol. 64. № 34. P. 17093–17097. DOI: https://doi.org/10.1021/acs.inorgchem.5c02704.

12. Serebrennikova O. O. et al. Aqueous micellar environment impacts the Co-catalyzed phototransformation: A case study / O. O. Serebrennikova et al. *ACS Catalysis*. 2025. Vol. 15. № 3. P. 1820–1831. DOI: https://doi.org/10.1021/acscatal.4c05678.

13. Khomenko D. M. et al. Novel hydroxyl-functionalized 1,2,4-triazole-based oligomers: synthetic approach, photoluminescence and coordination behaviour as uranyl chelators. *CrystEngComm*. 2026. Vol. 28. № 22. P. 3486–3498. DOI: https://doi.org/10.1039/D6CE00233A.

14. Urbank C., Vondung L. Accurate Molecular Size Determination by Diffusion Ordered NMR Spectroscopy Based on an Improved Diffusion Model. *Chemistry – A European Journal*. 2026. Art. e71471. DOI: https://doi.org/10.1002/chem.71471.

15. Zheng G., Price W. S. Direct hydrodynamic radius measurement on dissolved organic matter in natural waters using diffusion NMR. *Environmental Science & Technology*. 2012. Vol. 46. № 3. P. 1675–1680. DOI: https://doi.org/10.1021/es202809e.

16. Simpson A. J., McNally D. J., Simpson M. J. NMR spectroscopy in environmental research: From molecular interactions to global processes / A. J. Simpson, D. J. McNally, M. J. Simpson. *Progress in Nuclear Magnetic Resonance Spectroscopy*. 2011. Vol. 58. № 3–4. P. 97–175. DOI: https://doi.org/10.1016/j.pnmrs.2010.09.001.

17. Gauthier J. R., Mabury S. A. Experimentally Determined Aqueous Diffusion Coefficients of PFAS Using ^{19}F NMR Diffusion-Ordered Spectroscopy. *ACS EST Water*. 2024. Vol. 4. № 10. P. 4615–4624. DOI: https://doi.org/10.1021/acsestwater.4c00631.

18. Mazzei P., Piccolo A. Quantitative Evaluation of Noncovalent Interactions between Glyphosate and Dissolved Humic Substances by NMR Spectroscopy. *Environmental Science & Technology*. 2012. Vol. 46. № 11. P. 5939–5946. DOI: https://doi.org/10.1021/es300265a.

19. Ma H. et al. Utilizing 3D DOSY NMR in the characterization of organic compounds in coal chemical wastewater. *Magnetic Resonance Letters*. 2022. Vol. 2. № 2. Art. 100021. DOI: https://doi.org/10.1016/j.mrl.2021.100021.

20. Gauthier J. R. et al. Exploring the Composition and Authenticity of Honey and Syrup Samples Using Quantitative NMR Spectroscopy and Principal Component Analysis in an Upper-Year Undergraduate Analytical Environmental Course. *Journal of Chemical Education.* 2023. Vol. 100. № 1. P. 161–169. DOI: https://doi.org/10.1021/acs.jchemed.2c00501.

Information about the authors:
Hreben Mariia,
Postgraduate Student
Taras Shevchenko National University of Kyiv
60, Volodymyrska Street, Kyiv, Ukraine

Lampeka Rostyslav,
Doctor of Chemical Sciences, Professor,
Head of the Department of Inorganic Chemistry
Taras Shevchenko National University of Kyiv
60, Volodymyrska Street, Kyiv, Ukraine

CHAPTER 24

CHEMICAL FOUNDATIONS OF UKRAINE'S SUSTAINABLE DEVELOPMENTIN THE CONTEXT OF GREEN ENERGY AND INDUSTRIAL DECARBONIZATION

Kochubei Olena
DOI https://doi.org/10.30525/978-9934-26-714-7-24

INTRODUCTION

Ukraine's sustainable development is directly linked to the modernization of its energy sector and industry, since these two sectors determine the scale of natural-resource use, the energy intensity of the economy, and the volume of greenhouse gas emissions. Chemical science occupies a central place in this process: it explains the mechanisms of energy conversion and underpins the creation of new materials, catalysts, electrolytes, sorbents, and membranes, as well as the technologies for purification and resource reuse. Chemistry is therefore not an auxiliary discipline but a fundamental basis for the transition to a low-carbon economic model.

For Ukraine, decarbonization carries a dual significance. On the one hand, it is necessary to fulfil climate commitments, improve the competitiveness of domestic products, and move closer to European environmental standards. On the other hand, it is a component of energy security and post-war recovery, since reducing dependence on fossil fuels lowers the economy's vulnerability to external supply and price fluctuations. The strategic benchmarks for this transition are set out in Ukraine's Low-Carbon Development Strategy until 2050 and in the National Energy and Climate Plan until 2030.

The purpose of this section is to substantiate the role of chemical processes and technologies in the development of green energy and the decarbonization of Ukrainian industry. The material is divided into two subsections. The first examines the chemical foundations of solar, wind, hydrogen, bio-based, and electrochemical energy. The second analyses technological pathways for reducing emissions in metallurgy, cement, chemical, and other energy-intensive industries, together with the principles of green chemistry, the circular economy, and carbon capture.

1. Chemical foundations of Ukraine's green energy

The scale and pace of the chemical modernization of the energy sector are defined by official target indicators. Ukraine's National Renewable Energy Action Plan until 2030 envisages increasing the share of renewables in final energy consumption from about 10% (2022) to at least 27%, commissioning roughly 10 GW of new renewable capacity, and cutting greenhouse gas emissions by 65% relative to 1990 levels; the investment required is estimated at USD 41.5–50 billion[1]. Indicative targets for individual technologies are summarized in Table 1.

Table 1

Target indicators for the development of Ukraine's renewable and hydrogen energy sectors until 2030

Direction	2022 (baseline)	2030 target	Key chemical challenge
Solar power (photovoltaics)	7,327 MW	12,200 MW, incl. 5,000 MW of distributed prosumer generation	Silicon purification and doping, stability of photoactive layers
Wind power	512 MW (excl. temporarily occupied territories)	6,214 MW, incl. 100 MW offshore	Durability of composite blades, recycling of reinforced polymers
Biomass and biogas	–	876 MW of installed capacity	Purifying biogas of H_2S, moisture, and siloxanes to grid quality
Flexible generation and storage	–	656 MW of storage systems	Electrolyte safety, electrode degradation
Hydrogen (electrolyzers)	<0.1 GW	up to 10 GW of capacity; 1.3 Mt H2 by 2035, 3.0 Mt by 2050	Efficiency of electrolysis membranes and catalysts, water purity
Share of renewables in final consumption	≈10%	≥27%	–
GHG emission reduction (vs. 1990)	–	−65%	–

Source: compiled by the author based on the National Renewable Energy Action Plan [1], the National Energy and Climate Plan [2], the draft Hydrogen Strategy of Ukraine [13; 14], and the CSIS overview [12].

[1] Про затвердження Національного плану дій з відновлюваної енергетики на період до 2030 року та плану заходів з його виконання : розпорядження Кабінету Міністрів України від 13 серпня 2024 року № 761-р. *Законодавство України :* база даних / Верховна Рада України. URL: https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/761-2024-%D1%80 (дата звернення: 20.07.2026). Про схвалення Національного плану з енергетики та клімату на період до 2030 року : розпорядження Кабінету Міністрів України від 25 червня 2024 року № 587-р. *Законодавство України :* база даних / Верховна Рада України. URL: https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/587-2024-%D1%80 (дата звернення: 20.07.2026). Striving for Access, Security, and Sustainability: Ukraine's Transition to a Modern and Decentralized Energy System. Center for Strategic and International Studies. 2026. URL: https://www.csis.org/analysis/striving-access-security-and-sustainability (дата звернення: 20.07.2026).

The chemical basis of solar power lies in the fact that semiconductor materials, primarily crystalline silicon, convert photon energy into electric current. For Ukraine, this area is important not only as a way to reduce the use of fossil fuels, but also as an opportunity to build new technological chains. Key issues include silicon purification and doping, the stability of photoactive layers, and module recycling. The environmental assessment should cover the full life cycle: raw-material extraction, equipment manufacturing, operation, maintenance, and end-of-life recycling[2].

The chemical basis of wind power lies in the fact that electricity is generated without fuel combustion, although turbine structures require polymer composites, lubricants, and rare-earth components. For Ukraine, this area is important not only as a way to reduce the use of fossil fuels, but also as an opportunity to build new technological chains. Key issues include blade durability, corrosion resistance, and the recycling of reinforced polymers. The environmental assessment should cover the full life cycle: raw-material extraction, equipment manufacturing, operation, maintenance, and end-of-life recycling[3].

The chemical basis of energy storage lies in the fact that lithium-ion, sodium-ion, and flow batteries operate through reversible redox reactions. For Ukraine, this area is important not only as a way to reduce the use of fossil fuels, but also as an opportunity to build new technological chains. Key issues include electrolyte safety, the resource availability of metals, electrode degradation, and battery reuse. The environmental assessment should cover the full life cycle: raw-material extraction, equipment manufacturing, operation, maintenance, and end-of-life recycling[4].

The chemical basis of green hydrogen production lies in the fact that water electrolysis converts electrical energy into the chemical energy of molecular hydrogen. For Ukraine, this area is important not only as a way to reduce the use of fossil fuels, but also as an opportunity to build new technological chains. Key issues include the efficiency of electrodes,

---

[2] Про затвердження Національного плану дій з відновлюваної енергетики на період до 2030 року та плану заходів з його виконання : розпорядження Кабінету Міністрів України від 13 серпня 2024 року № 761-р. *Законодавство України :* база даних / Верховна Рада України. URL: https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/761-2024-%D1%80 (дата звернення: 20.07.2026).

[3] REmap 2030: Renewable Energy Prospects for Ukraine. Abu Dhabi : International Renewable Energy Agency, 2015. URL: https://www.irena.org/-/media/Files/IRENA/Agency/Publication/2015/Apr/IRENA_REmap_Ukraine_paper_2015.pdf (date of access: 20.07.2026). World Energy Transitions Outlook 2024: 1.5 °C Pathway. Abu Dhabi : International Renewable Energy Agency, 2024. URL: https://www.irena.org/publications/2024/Nov/World-Energy-Transitions-Outlook-2024 (date of access: 20.07.2026).

[4] Kudria S., Ivanchenko I., Tuchynskyi B., Petrenko K., Karmazin O., Riepkin O. Resource potential for wind-hydrogen power in Ukraine. *International Journal of Hydrogen Energy.* 2021. Vol. 46. Issue 1. P. 157–168. DOI: 10.1016/j.ijhydene.2020.09.211

membranes and catalysts, water purity, and the source of the electricity used. The environmental assessment should cover the full life cycle: raw-material extraction, equipment manufacturing, operation, maintenance, and end-of-life recycling[5].

The chemical basis of hydrogen storage lies in the fact that hydrogen can be stored in compressed, liquefied, or chemically bound form. For Ukraine, this area is important not only as a way to reduce the use of fossil fuels, but also as an opportunity to build new technological chains. Key issues include leakage, hydrogen embrittlement of metals, the energy cost of compression, and infrastructure safety. The environmental assessment should cover the full life cycle: raw-material extraction, equipment manufacturing, operation, maintenance, and end-of-life recycling[6].

The chemical basis of green ammonia lies in the fact that the ammonia synthesis reaction combines atmospheric nitrogen with hydrogen to yield a feedstock for fertilizers and energy applications. For Ukraine, this area is important not only as a way to reduce the use of fossil fuels, but also as an opportunity to build new technological chains. Key issues include replacing grey hydrogen with green hydrogen, improving catalytic efficiency, and controlling toxicity. The environmental assessment should cover the full life cycle: raw-material extraction, equipment manufacturing, operation, maintenance, and end-of-life recycling.

The chemical basis of biogas and biomethane lies in the fact that the anaerobic digestion of organic waste produces a mixture of methane and carbon dioxide. For Ukraine, this area is important not only as a way to reduce the use of fossil fuels, but also as an opportunity to build new technological chains. Key issues include the removal of hydrogen sulphide, water vapour, and siloxanes, and upgrading the gas to grid quality. The environmental assessment should cover the full life cycle: raw-material extraction, equipment manufacturing, operation, maintenance, and end-of-life recycling.

The chemical basis of liquid biofuels lies in the fact that the transesterification of oils and the fermentation of sugars yield biodiesel and bioethanol. For Ukraine, this area is important not only as a way to reduce the use of fossil fuels, but also as an opportunity to build new technological chains. Key issues include using waste feedstocks instead of food crops, product purification, and the processing of by-product streams. The environmental assessment should

[5] Strielkowski W. Efficient low-carbon development in green hydrogen and ammonia economy: a case of Ukraine. arXiv. 2025. arXiv:2503.22326. URL: https://arxiv.org/abs/2503.22326 (date of access: 20.07.2026).

[6] World Energy Transitions Outlook 2024: 1.5 °C Pathway. Abu Dhabi : International Renewable Energy Agency, 2024. URL: https://www.irena.org/publications/2024/Nov/World-Energy-Transitions-Outlook-2024 (date of access: 20.07.2026).

cover the full life cycle: raw-material extraction, equipment manufacturing, operation, maintenance, and end-of-life recycling[7].

The chemical basis of heat pumps lies in the fact that phase transitions of refrigerants transfer heat from a low-temperature source to the consumer. For Ukraine, this area is important not only as a way to reduce the use of fossil fuels, but also as an opportunity to build new technological chains. Key issues include the transition to refrigerants with low global warming potential and improved system tightness. The environmental assessment should cover the full life cycle: raw-material extraction, equipment manufacturing, operation, maintenance, and end-of-life recycling[8].

The chemical basis of fuel cells lies in the fact that the electrochemical oxidation of hydrogen directly yields electricity and water. For Ukraine, this area is important not only as a way to reduce the use of fossil fuels, but also as an opportunity to build new technological chains. Key issues include catalyst cost, fuel purity, membrane lifetime, and thermal management. The environmental assessment should cover the full life cycle: raw-material extraction, equipment manufacturing, operation, maintenance, and end-of-life recycling.

The chemical basis of synthetic fuels lies in the fact that green hydrogen can react with captured CO_2 to form methanol or hydrocarbons. For Ukraine, this area is important not only as a way to reduce the use of fossil fuels, but also as an opportunity to build new technological chains. Key issues include low overall energy efficiency and the need to limit use to hard-to-electrify sectors. The environmental assessment should cover the full life cycle: raw-material extraction, equipment manufacturing, operation, maintenance, and end-of-life recycling.

The chemical basis of thermal energy storage lies in the fact that molten salts and phase-change materials can store substantial amounts of heat. For Ukraine, this area is important not only as a way to reduce the use of fossil fuels, but also as an opportunity to build new technological chains. Key issues include corrosion, cycling stability, thermal conductivity, and material safety. The environmental assessment should cover the full life cycle: raw-material

[7] REmap 2030: Renewable Energy Prospects for Ukraine. Abu Dhabi : International Renewable Energy Agency, 2015. URL: https://www.irena.org/-/media/Files/IRENA/Agency/Publication/2015/Apr/IRENA_REmap_Ukraine_paper_2015.pdf (date of access: 20.07.2026). Ukraine Energy Profile. International Energy Agency. Paris, 2020. URL: https://www.iea.org/reports/ukraine-energy-profile (date of access: 20.07.2026).

[8] Decarbonisation Roadmap for the Contracting Parties of the Energy Community : General Policy Guidelines 01/2021/MC-EnC. *Energy Community.* 2021. URL: https://www.energy-community.org/dam/jcr:45eab70a-051a-41be-a530-864adb2a669b/19thMC_Decarbonisation_Roadmap_301121.pdf (date of access: 20.07.2026).

extraction, equipment manufacturing, operation, maintenance, and end-of-life recycling[9].

The development of solar power requires the alignment of chemical, energy, and economic parameters. Even a technology with minimal emissions during operation may have a significant hidden impact if its materials are obtained through energy-intensive methods or become hazardous waste after use. This is why particular attention should be paid to aspects such as silicon purification and doping, the stability of photoactive layers, and module recycling. For Ukrainian projects, it is advisable to combine equipment imports with the localization of servicing, laboratory control, and the gradual domestic production of components.

The development of wind power requires the alignment of chemical, energy, and economic parameters. Even a technology with minimal emissions during operation may have a significant hidden impact if its materials are obtained through energy-intensive methods or become hazardous waste after use. This is why particular attention should be paid to aspects such as blade durability, corrosion resistance, and the recycling of reinforced polymers. For Ukrainian projects, it is advisable to combine equipment imports with the localization of servicing, laboratory control, and the gradual domestic production of components.

The development of energy storage requires the alignment of chemical, energy, and economic parameters. Even a technology with minimal emissions during operation may have a significant hidden impact if its materials are obtained through energy-intensive methods or become hazardous waste after use. This is why particular attention should be paid to aspects such as electrolyte safety, the resource availability of metals, electrode degradation, and battery reuse. For Ukrainian projects, it is advisable to combine equipment imports with the localization of servicing, laboratory control, and the gradual domestic production of components.

The development of green hydrogen production requires the alignment of chemical, energy, and economic parameters. Even a technology with minimal emissions during operation may have a significant hidden impact if its materials are obtained through energy-intensive methods or become hazardous waste after use. This is why particular attention should be paid to aspects such as the efficiency of electrodes, membranes and catalysts, water purity, and the source of the electricity used. For Ukrainian projects, it is advisable to combine equipment imports with the localization of servicing, laboratory control, and the gradual domestic production of components.

[9] Ukraine Energy Profile. International Energy Agency. Paris, 2020. URL: https://www.iea.org/reports/ukraine-energy-profile (date of access: 20.07.2026).

The development of hydrogen storage requires the alignment of chemical, energy, and economic parameters. Even a technology with minimal emissions during operation may have a significant hidden impact if its materials are obtained through energy-intensive methods or become hazardous waste after use. This is why particular attention should be paid to aspects such as leakage, hydrogen embrittlement of metals, the energy cost of compression, and infrastructure safety. For Ukrainian projects, it is advisable to combine equipment imports with the localization of servicing, laboratory control, and the gradual domestic production of components.

The development of green ammonia requires the alignment of chemical, energy, and economic parameters. Even a technology with minimal emissions during operation may have a significant hidden impact if its materials are obtained through energy-intensive methods or become hazardous waste after use. This is why particular attention should be paid to aspects such as replacing grey hydrogen with green hydrogen, improving catalytic efficiency, and controlling toxicity. For Ukrainian projects, it is advisable to combine equipment imports with the localization of servicing, laboratory control, and the gradual domestic production of components.

The development of biogas and biomethane requires the alignment of chemical, energy, and economic parameters. Even a technology with minimal emissions during operation may have a significant hidden impact if its materials are obtained through energy-intensive methods or become hazardous waste after use. This is why particular attention should be paid to aspects such as the removal of hydrogen sulphide, water vapour, and siloxanes, and upgrading the gas to grid quality. For Ukrainian projects, it is advisable to combine equipment imports with the localization of servicing, laboratory control, and the gradual domestic production of components.

The development of liquid biofuels requires the alignment of chemical, energy, and economic parameters. Even a technology with minimal emissions during operation may have a significant hidden impact if its materials are obtained through energy-intensive methods or become hazardous waste after use. This is why particular attention should be paid to aspects such as using waste feedstocks instead of food crops, product purification, and the processing of by-product streams. For Ukrainian projects, it is advisable to combine equipment imports with the localization of servicing, laboratory control, and the gradual domestic production of components[10].

[10] Про затвердження Національного плану дій з відновлюваної енергетики на період до 2030 року та плану заходів з його виконання : розпорядження Кабінету Міністрів України від 13 серпня 2024 року № 761-р. Законодавство України : база даних / Верховна Рада України. URL: https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/761-2024-%D1%80 (дата звернення: 20.07.2026).

The development of heat pumps requires the alignment of chemical, energy, and economic parameters. Even a technology with minimal emissions during operation may have a significant hidden impact if its materials are obtained through energy-intensive methods or become hazardous waste after use. This is why particular attention should be paid to aspects such as the transition to refrigerants with low global warming potential and improved system tightness. For Ukrainian projects, it is advisable to combine equipment imports with the localization of servicing, laboratory control, and the gradual domestic production of components.

The development of fuel cells requires the alignment of chemical, energy, and economic parameters. Even a technology with minimal emissions during operation may have a significant hidden impact if its materials are obtained through energy-intensive methods or become hazardous waste after use. This is why particular attention should be paid to aspects such as catalyst cost, fuel purity, membrane lifetime, and thermal management. For Ukrainian projects, it is advisable to combine equipment imports with the localization of servicing, laboratory control, and the gradual domestic production of components[11].

The development of synthetic fuels requires the alignment of chemical, energy, and economic parameters. Even a technology with minimal emissions during operation may have a significant hidden impact if its materials are obtained through energy-intensive methods or become hazardous waste after use. This is why particular attention should be paid to aspects such as low overall energy efficiency and the need to limit use to hard-to-electrify sectors. For Ukrainian projects, it is advisable to combine equipment imports with the localization of servicing, laboratory control, and the gradual domestic production of components.

The development of thermal energy storage requires the alignment of chemical, energy, and economic parameters. Even a technology with minimal emissions during operation may have a significant hidden impact if its materials are obtained through energy-intensive methods or become hazardous waste after use. This is why particular attention should be paid to aspects such as corrosion, cycling stability, thermal conductivity, and material safety. For Ukrainian projects, it is advisable to combine equipment imports with the localization of servicing, laboratory control, and the gradual domestic production of components.

[11] Ukraine Energy Profile. International Energy Agency. Paris, 2020. URL: https://www.iea.org/reports/ukraine-energy-profile (date of access: 20.07.2026). World Energy Transitions Outlook 2024: 1.5 °C Pathway. Abu Dhabi : International Renewable Energy Agency, 2024. URL: https://www.irena.org/publications/2024/Nov/World-Energy-Transitions-Outlook-2024 (date of access: 20.07.2026).

The prospects of solar power are determined by the ability to integrate the technology into the energy system and industrial clusters. Since semiconductor materials, primarily crystalline silicon, convert photon energy into electric current, process efficiency depends on feedstock quality, temperature, pressure, catalysts, and operating conditions. Ukrainian research institutions could focus on reducing material intensity, replacing scarce elements, extending service life, and developing recycling technologies. This approach is consistent with the principles of green chemistry and Ukraine's National Renewable Energy Action Plan.

The prospects of wind power are determined by the ability to integrate the technology into the energy system and industrial clusters. Since electricity is generated without fuel combustion, although turbine structures require polymer composites, lubricants, and rare-earth components, process efficiency depends on feedstock quality, temperature, pressure, catalysts, and operating conditions. Ukrainian research institutions could focus on reducing material intensity, replacing scarce elements, extending service life, and developing recycling technologies. This approach is consistent with the principles of green chemistry and Ukraine's National Renewable Energy Action Plan.

The prospects of energy storage are determined by the ability to integrate the technology into the energy system and industrial clusters. Since lithium-ion, sodium-ion, and flow batteries operate through reversible redox reactions, process efficiency depends on feedstock quality, temperature, pressure, catalysts, and operating conditions. Ukrainian research institutions could focus on reducing material intensity, replacing scarce elements, extending service life, and developing recycling technologies. This approach is consistent with the principles of green chemistry and Ukraine's National Renewable Energy Action Plan.

The prospects of green hydrogen production are determined by the ability to integrate the technology into the energy system and industrial clusters. Since water electrolysis converts electrical energy into the chemical energy of molecular hydrogen, process efficiency depends on feedstock quality, temperature, pressure, catalysts, and operating conditions. Ukrainian research institutions could focus on reducing material intensity, replacing scarce elements, extending service life, and developing recycling technologies. This approach is consistent with the principles of green chemistry and Ukraine's National Renewable Energy Action Plan.

The prospects of hydrogen storage are determined by the ability to integrate the technology into the energy system and industrial clusters. Since hydrogen can be stored in compressed, liquefied, or chemically bound form, process efficiency depends on feedstock quality, temperature, pressure, catalysts, and operating

conditions. Ukrainian research institutions could focus on reducing material intensity, replacing scarce elements, extending service life, and developing recycling technologies. This approach is consistent with the principles of green chemistry and Ukraine's National Renewable Energy Action Plan.

The prospects of green ammonia are determined by the ability to integrate the technology into the energy system and industrial clusters. Since the ammonia synthesis reaction combines atmospheric nitrogen with hydrogen to yield a feedstock for fertilizers and energy applications, process efficiency depends on feedstock quality, temperature, pressure, catalysts, and operating conditions. Ukrainian research institutions could focus on reducing material intensity, replacing scarce elements, extending service life, and developing recycling technologies. This approach is consistent with the principles of green chemistry and Ukraine's National Renewable Energy Action Plan.

The prospects of biogas and biomethane are determined by the ability to integrate the technology into the energy system and industrial clusters. Since the anaerobic digestion of organic waste produces a mixture of methane and carbon dioxide, process efficiency depends on feedstock quality, temperature, pressure, catalysts, and operating conditions. Ukrainian research institutions could focus on reducing material intensity, replacing scarce elements, extending service life, and developing recycling technologies. This approach is consistent with the principles of green chemistry and Ukraine's National Renewable Energy Action Plan.

The prospects of liquid biofuels are determined by the ability to integrate the technology into the energy system and industrial clusters. Since the transesterification of oils and the fermentation of sugars yield biodiesel and bioethanol, process efficiency depends on feedstock quality, temperature, pressure, catalysts, and operating conditions. Ukrainian research institutions could focus on reducing material intensity, replacing scarce elements, extending service life, and developing recycling technologies. This approach is consistent with the principles of green chemistry and Ukraine's National Renewable Energy Action Plan.

The prospects of heat pumps are determined by the ability to integrate the technology into the energy system and industrial clusters. Since phase transitions of refrigerants transfer heat from a low-temperature source to the consumer, process efficiency depends on feedstock quality, temperature, pressure, catalysts, and operating conditions. Ukrainian research institutions could focus on reducing material intensity, replacing scarce elements, extending service life, and developing recycling technologies. This approach is consistent with the principles of green chemistry and Ukraine's National Renewable Energy Action Plan.

The prospects of fuel cells are determined by the ability to integrate the technology into the energy system and industrial clusters. Since the electrochemical oxidation of hydrogen directly yields electricity and water, process efficiency depends on feedstock quality, temperature, pressure, catalysts, and operating conditions. Ukrainian research institutions could focus on reducing material intensity, replacing scarce elements, extending service life, and developing recycling technologies. This approach is consistent with the principles of green chemistry and Ukraine's National Renewable Energy Action Plan.

The prospects of synthetic fuels are determined by the ability to integrate the technology into the energy system and industrial clusters. Since green hydrogen can react with captured CO_2 to form methanol or hydrocarbons, process efficiency depends on feedstock quality, temperature, pressure, catalysts, and operating conditions. Ukrainian research institutions could focus on reducing material intensity, replacing scarce elements, extending service life, and developing recycling technologies. This approach is consistent with the principles of green chemistry and Ukraine's National Renewable Energy Action Plan.

The prospects of thermal energy storage are determined by the ability to integrate the technology into the energy system and industrial clusters. Since molten salts and phase-change materials can store substantial amounts of heat, process efficiency depends on feedstock quality, temperature, pressure, catalysts, and operating conditions. Ukrainian research institutions could focus on reducing material intensity, replacing scarce elements, extending service life, and developing recycling technologies. This approach is consistent with the principles of green chemistry and Ukraine's National Renewable Energy Action Plan.

Ukraine's green energy sector should develop as an interconnected system. Solar and wind generation produce low-carbon electricity; batteries provide short-term balancing; hydrogen and synthetic energy carriers can serve as seasonal storage and industrial feedstock; biomethane makes use of local organic resources. Studies of Ukraine's wind-hydrogen resource potential confirm the feasibility of further developing this direction[12].

At the same time, scaling up new technologies must not outpace the development of safety and waste-management systems. Batteries, solar panels,

[12] Kudria S., Ivanchenko I., Tuchynskyi B., Petrenko K., Karmazin O., Riepkin O. Resource potential for wind-hydrogen power in Ukraine. *International Journal of Hydrogen Energy.* 2021. Vol. 46. Issue 1. P. 157–168. DOI: 10.1016/j.ijhydene.2020.09.211. REmap 2030: Renewable Energy Prospects for Ukraine. Abu Dhabi : International Renewable Energy Agency, 2015. URL: https://www.irena.org/-/media/Files/IRENA/Agency/Publication/2015/Apr/IRENA_REmap_Ukraine_paper_2015.pdf (date of access: 20.07.2026).

membranes, catalysts, and composites contain substances that require controlled collection, transport, and processing. Extended producer responsibility, eco-design standards, and laboratory monitoring should become an integral part of energy policy.

The chemical foundations of green energy therefore encompass not a single technology but a complex of processes for converting, storing, and transporting energy. Their deployment must rest on life-cycle assessment, resource security, regional characteristics, and Ukraine's scientific potential.

2. Chemical technologies for the decarbonization of Ukraine's industry

Industry-level data confirm the scale of the decarbonization challenge. In 2020, Ukraine's ferrous metallurgy sector generated about 48 Mt of CO_2 (≈15% of national emissions), and before the war the country ranked 14th in the world with a crude steel output of 21.4 Mt (2021)[13]. Specific emissions at individual enterprises range from 1.29 to 1.71 t CO_2 per tonne of product, and under the IEA criterion, "green steel" is defined as output with emissions below 0.4 t CO_2-eq./t for ore-based production and 0.05 t CO_2-eq./t for scrap-based production[14]. Indicative figures for other energy-intensive industries are given in Table 2.

The decarbonization of ferrous metallurgy involves replacing coke with hydrogen, direct iron reduction, and electric-arc melting. This direction is chemical in nature, since it changes the reagents, reaction mechanisms, gas-stream composition, and material balances involved. The main constraints are the cost of green hydrogen, ore quality, scrap availability, and grid modernization. Investment decisions must weigh not only direct emissions but also the carbon footprint of electricity, feedstock, and transport.

The decarbonization of the cement industry involves reducing the clinker factor and using calcined clays, slag, and CO_2 capture. This direction is chemical in nature, since it changes the reagents, reaction mechanisms, gas-stream composition, and material balances involved. The main constraints are process emissions from limestone decalcination and the stability of cement

[13] Devlin A., Mykhnenko V., Zagoruichyk A., Salmon N., Soldak M. Techno-economic optimisation of steel supply chains in the clean energy transition: A case study of post-war Ukraine. *Journal of Cleaner Production.* 2024. Vol. 466. Art. 142675. DOI: 10.1016/j.jclepro.2024.142675. Decarbonization of Ukraine's steel industry: the European way. GMK Center. 2025. URL: https://gmk.center/en/posts/decarbonization-of-ukraine-s-steel-industry-the-european-way/ (date of access: 20.07.2026).

[14] Devlin A., Mykhnenko V., Zagoruichyk A., Salmon N., Soldak M. Techno-economic optimisation of steel supply chains in the clean energy transition: A case study of post-war Ukraine. *Journal of Cleaner Production.* 2024. Vol. 466. Art. 142675. DOI: 10.1016/j.jclepro.2024.142675. Decarbonization of Ukraine's steel industry: the European way. *GMK Center.* 2025. URL: https://gmk.center/en/posts/decarbonization-of-ukraine-s-steel-industry-the-european-way/ (date of access: 20.07.2026).

properties. Investment decisions must weigh not only direct emissions but also the carbon footprint of electricity, feedstock, and transport[15].

Table 2

Specific CO_2 emissions and decarbonization benchmarks for Ukraine's energy-intensive industries

Industry	Current CO_2 emission intensity	Key process factor	Target / reduction potential
Ferrous metallurgy	48 Mt CO_2 (2020); 1.29–1.71 t CO2/t of product at individual enterprises	Share of the blast-furnace/converter route, scrap volume	−25…−26% by 2030 (vs. 2023); "green steel" threshold < 0.4 t CO_2-eq./t; investment need ≈ USD 12 billion
Cement industry	832–1,075 kg CO_2-eq./t of clinker; clinker factor ≈75%	Limestone decalcination (≈2/3 of total emissions)	Reducing the clinker factor to 65%; near-zero-emission class ≤125 kg CO_2-eq./t
Ammonia production	–	Haber – Bosch reaction, hydrogen source	Replacing grey hydrogen with green (electrolytic) hydrogen
Nitric acid production	–	By-product N_2O in tail gases	Catalytic destruction of N_2O in tail gases

Source: compiled by the author based on [5; 11; 15].

The decarbonization of ammonia production involves using green hydrogen in the Haber – Bosch reaction. This direction is chemical in nature, since it changes the reagents, reaction mechanisms, gas-stream composition, and material balances involved. The main constraints are the energy intensity of compression, catalyst efficiency, and the safe handling of ammonia. Investment decisions must weigh not only direct emissions but also the carbon footprint of electricity, feedstock, and transport.

The decarbonization of nitric acid production involves the catalytic destruction of by-product N_2O in tail gases. This direction is chemical in nature, since it changes the reagents, reaction mechanisms, gas-stream composition, and material balances involved. The main constraints are catalyst reliability, temperature control, and continuous monitoring. Investment decisions must weigh not only direct emissions but also the carbon footprint of electricity, feedstock, and transport[16].

[15] Decarbonisation Roadmap for the Contracting Parties of the Energy Community : General Policy Guidelines 01/2021/MC-EnC. *Energy Community.* 2021. URL: https://www.energy-community.org/dam/jcr:45eab70a-051a-41be-a530-864adb2a669b/19thMC_Decarbonisation_Roadmap_301121.pdf (date of access: 20.07.2026).

[16] World Energy Transitions Outlook 2024: 1.5 °C Pathway. Abu Dhabi : International Renewable Energy Agency, 2024. URL: https://www.irena.org/publications/2024/Nov/World-Energy-Transitions-Outlook-2024 (date of access: 20.07.2026).

The decarbonization of oil refining and organic synthesis involves electrifying heating, replacing fossil feedstocks with bio-based ones, and using low-carbon hydrogen. This direction is chemical in nature, since it changes the reagents, reaction mechanisms, gas-stream composition, and material balances involved. The main constraints are the complexity of process schemes, the quality of alternative feedstocks, and capital intensity. Investment decisions must weigh not only direct emissions but also the carbon footprint of electricity, feedstock, and transport.

The decarbonization of glass and ceramics production involves electric or hydrogen heating of high-temperature furnaces. This direction is chemical in nature, since it changes the reagents, reaction mechanisms, gas-stream composition, and material balances involved. The main constraints are temperature-field stability, batch composition, and refractory-material lifetime. Investment decisions must weigh not only direct emissions but also the carbon footprint of electricity, feedstock, and transport.

The decarbonization of the mining and processing sector involves electrifying transport, optimizing crushing, and reusing water. This direction is chemical in nature, since it changes the reagents, reaction mechanisms, gas-stream composition, and material balances involved. The main constraints are the high energy intensity of crushing, tailings generation, and the need to recover valuable components. Investment decisions must weigh not only direct emissions but also the carbon footprint of electricity, feedstock, and transport.

The decarbonization of industrial wastewater treatment involves membrane separation, sorption, electrodialysis, and oxidative processes. This direction is chemical in nature, since it changes the reagents, reaction mechanisms, gas-stream composition, and material balances involved. The main constraints are concentrate management, sorbent regeneration, energy costs, and water recirculation. Investment decisions must weigh not only direct emissions but also the carbon footprint of electricity, feedstock, and transport.

The decarbonization of industrial waste management involves sorting, chemical stabilization, metal recovery, and mineralization. This direction is chemical in nature, since it changes the reagents, reaction mechanisms, gas-stream composition, and material balances involved. The main constraints are toxic contaminants, feedstock heterogeneity, and confirming environmental safety. Investment decisions must weigh not only direct emissions but also the carbon footprint of electricity, feedstock, and transport.

The decarbonization of carbon capture involves amine absorption, adsorption, and membrane or cryogenic separation. This direction is chemical in nature, since it changes the reagents, reaction mechanisms, gas-stream composition, and material balances involved. The main constraints are the

heat required for solvent regeneration, sorbent degradation, and long-term CO_2 storage. Investment decisions must weigh not only direct emissions but also the carbon footprint of electricity, feedstock, and transport.

The decarbonization of industrial electrification involves induction, resistive, and plasma heating, and high-temperature heat pumps. This direction is chemical in nature, since it changes the reagents, reaction mechanisms, gas-stream composition, and material balances involved. The main constraints are power-supply reliability, modernization costs, and the need for low-carbon generation. Investment decisions must weigh not only direct emissions but also the carbon footprint of electricity, feedstock, and transport.

The decarbonization of circular chemistry involves the regeneration of solvents, acids, alkalis, and catalysts, together with industrial symbiosis. This direction is chemical in nature, since it changes the reagents, reaction mechanisms, gas-stream composition, and material balances involved. The main constraints are secondary-feedstock quality standards, traceability, and inter-enterprise economic coordination. Investment decisions must weigh not only direct emissions but also the carbon footprint of electricity, feedstock, and transport.

In the field of ferrous metallurgy, it is advisable to combine radical technological change with phased energy-efficiency measures. Even before a full overhaul of production, heat losses can be reduced, gas cleaning improved, catalysis optimized, and part of the secondary streams returned to the process. At the same time, the cost of green hydrogen, ore quality, scrap availability, and grid modernization remain important risk factors. Modernization must therefore be accompanied by laboratory control, digital accounting, and verification of the actual emission reductions achieved.

In the field of the cement industry, it is advisable to combine radical technological change with phased energy-efficiency measures. Even before a full overhaul of production, heat losses can be reduced, gas cleaning improved, catalysis optimized, and part of the secondary streams returned to the process. At the same time, process emissions from limestone decalcination and the stability of cement properties remain important risk factors. Modernization must therefore be accompanied by laboratory control, digital accounting, and verification of the actual emission reductions achieved.

In the field of ammonia production, it is advisable to combine radical technological change with phased energy-efficiency measures. Even before a full overhaul of production, heat losses can be reduced, gas cleaning improved, catalysis optimized, and part of the secondary streams returned to the process. At the same time, the energy intensity of compression, catalyst efficiency, and the safe handling of ammonia remain important risk factors. Modernization

must therefore be accompanied by laboratory control, digital accounting, and verification of the actual emission reductions achieved.

In the field of nitric acid production, it is advisable to combine radical technological change with phased energy-efficiency measures. Even before a full overhaul of production, heat losses can be reduced, gas cleaning improved, catalysis optimized, and part of the secondary streams returned to the process. At the same time, catalyst reliability, temperature control, and continuous monitoring remain important risk factors. Modernization must therefore be accompanied by laboratory control, digital accounting, and verification of the actual emission reductions achieved[17].

In the field of oil refining and organic synthesis, it is advisable to combine radical technological change with phased energy-efficiency measures. Even before a full overhaul of production, heat losses can be reduced, gas cleaning improved, catalysis optimized, and part of the secondary streams returned to the process. At the same time, the complexity of process schemes, the quality of alternative feedstocks, and capital intensity remain important risk factors. Modernization must therefore be accompanied by laboratory control, digital accounting, and verification of the actual emission reductions achieved[18].

In the field of glass and ceramics production, it is advisable to combine radical technological change with phased energy-efficiency measures. Even before a full overhaul of production, heat losses can be reduced, gas cleaning improved, catalysis optimized, and part of the secondary streams returned to the process. At the same time, temperature-field stability, batch composition, and refractory-material lifetime remain important risk factors. Modernization must therefore be accompanied by laboratory control, digital accounting, and verification of the actual emission reductions achieved[19].

In the field of the mining and processing sector, it is advisable to combine radical technological change with phased energy-efficiency measures. Even before a full overhaul of production, heat losses can be reduced, gas cleaning improved, catalysis optimized, and part of the secondary streams returned to the process. At the same time, the high energy intensity of crushing, tailings generation, and the need to recover valuable components remain important risk

[17] World Energy Transitions Outlook 2024: 1.5 °C Pathway. Abu Dhabi : International Renewable Energy Agency, 2024. URL: https://www.irena.org/publications/2024/Nov/World-Energy-Transitions-Outlook-2024 (date of access: 20.07.2026).

[18] Kudria S., Ivanchenko I., Tuchynskyi B., Petrenko K., Karmazin O., Riepkin O. Resource potential for wind-hydrogen power in Ukraine. *International Journal of Hydrogen Energy.* 2021. Vol. 46. Issue 1. P. 157–168. DOI: 10.1016/j.ijhydene.2020.09.211

[19] Strielkowski W. Efficient low-carbon development in green hydrogen and ammonia economy: a case of Ukraine. arXiv. 2025. arXiv:2503.22326. URL: https://arxiv.org/abs/2503.22326 (date of access: 20.07.2026).

factors. Modernization must therefore be accompanied by laboratory control, digital accounting, and verification of the actual emission reductions achieved.

In the field of industrial wastewater treatment, it is advisable to combine radical technological change with phased energy-efficiency measures. Even before a full overhaul of production, heat losses can be reduced, gas cleaning improved, catalysis optimized, and part of the secondary streams returned to the process. At the same time, concentrate management, sorbent regeneration, energy costs, and water recirculation remain important risk factors. Modernization must therefore be accompanied by laboratory control, digital accounting, and verification of the actual emission reductions achieved.

In the field of industrial waste management, it is advisable to combine radical technological change with phased energy-efficiency measures. Even before a full overhaul of production, heat losses can be reduced, gas cleaning improved, catalysis optimized, and part of the secondary streams returned to the process. At the same time, toxic contaminants, feedstock heterogeneity, and confirming environmental safety remain important risk factors. Modernization must therefore be accompanied by laboratory control, digital accounting, and verification of the actual emission reductions achieved.

In the field of carbon capture, it is advisable to combine radical technological change with phased energy-efficiency measures. Even before a full overhaul of production, heat losses can be reduced, gas cleaning improved, catalysis optimized, and part of the secondary streams returned to the process. At the same time, the heat required for solvent regeneration, sorbent degradation, and long-term CO_2 storage remain important risk factors. Modernization must therefore be accompanied by laboratory control, digital accounting, and verification of the actual emission reductions achieved.

In the field of industrial electrification, it is advisable to combine radical technological change with phased energy-efficiency measures. Even before a full overhaul of production, heat losses can be reduced, gas cleaning improved, catalysis optimized, and part of the secondary streams returned to the process. At the same time, power-supply reliability, modernization costs, and the need for low-carbon generation remain important risk factors. Modernization must therefore be accompanied by laboratory control, digital accounting, and verification of the actual emission reductions achieved.

In the field of circular chemistry, it is advisable to combine radical technological change with phased energy-efficiency measures. Even before a full overhaul of production, heat losses can be reduced, gas cleaning improved, catalysis optimized, and part of the secondary streams returned to the process. At the same time, secondary-feedstock quality standards, traceability, and inter-enterprise economic coordination remain important risk factors. Modernization

must therefore be accompanied by laboratory control, digital accounting, and verification of the actual emission reductions achieved.

The prospects of ferrous metallurgy in a low-carbon economy will be determined by enterprises' ability to deploy replacing coke with hydrogen, direct iron reduction, and electric-arc melting. Ukraine has the opportunity to embed such solutions in its post-war recovery programmes rather than reproducing outdated production schemes. Priority should go to technologies that simultaneously reduce emissions, decrease local pollution, improve resource efficiency, and generate higher-value-added products.

The prospects of the cement industry in a low-carbon economy will be determined by enterprises' ability to deploy reducing the clinker factor and using calcined clays, slag, and CO_2 capture. Ukraine has the opportunity to embed such solutions in its post-war recovery programmes rather than reproducing outdated production schemes. Priority should go to technologies that simultaneously reduce emissions, decrease local pollution, improve resource efficiency, and generate higher-value-added products[20].

The prospects of ammonia production in a low-carbon economy will be determined by enterprises' ability to deploy using green hydrogen in the Haber–Bosch reaction. Ukraine has the opportunity to embed such solutions in its post-war recovery programmes rather than reproducing outdated production schemes. Priority should go to technologies that simultaneously reduce emissions, decrease local pollution, improve resource efficiency, and generate higher-value-added products.

The prospects of nitric acid production in a low-carbon economy will be determined by enterprises' ability to deploy the catalytic destruction of by-product N2O in tail gases. Ukraine has the opportunity to embed such solutions in its post-war recovery programmes rather than reproducing outdated production schemes. Priority should go to technologies that simultaneously reduce emissions, decrease local pollution, improve resource efficiency, and generate higher-value-added products.

The prospects of oil refining and organic synthesis in a low-carbon economy will be determined by enterprises' ability to deploy electrifying heating, replacing fossil feedstocks with bio-based ones, and using low-carbon hydrogen. Ukraine has the opportunity to embed such solutions in its post-war recovery programmes rather than reproducing outdated production schemes. Priority should go to technologies that simultaneously reduce emissions, decrease local pollution, improve resource efficiency, and generate higher-value-added products.

[20] Decarbonisation Roadmap for the Contracting Parties of the Energy Community : General Policy Guidelines 01/2021/MC-EnC. *Energy Community.* 2021. URL: https://www.energy-community.org/dam/jcr:45eab70a-051a-41be-a530-864adb2a669b/19thMC_Decarbonisation_Roadmap_301121.pdf (date of access: 20.07.2026).

The prospects of glass and ceramics production in a low-carbon economy will be determined by enterprises' ability to deploy electric or hydrogen heating of high-temperature furnaces. Ukraine has the opportunity to embed such solutions in its post-war recovery programmes rather than reproducing outdated production schemes. Priority should go to technologies that simultaneously reduce emissions, decrease local pollution, improve resource efficiency, and generate higher-value-added products.

The prospects of the mining and processing sector in a low-carbon economy will be determined by enterprises' ability to deploy electrifying transport, optimizing crushing, and reusing water. Ukraine has the opportunity to embed such solutions in its post-war recovery programmes rather than reproducing outdated production schemes. Priority should go to technologies that simultaneously reduce emissions, decrease local pollution, improve resource efficiency, and generate higher-value-added products.

The prospects of industrial wastewater treatment in a low-carbon economy will be determined by enterprises' ability to deploy membrane separation, sorption, electrodialysis, and oxidative processes. Ukraine has the opportunity to embed such solutions in its post-war recovery programmes rather than reproducing outdated production schemes. Priority should go to technologies that simultaneously reduce emissions, decrease local pollution, improve resource efficiency, and generate higher-value-added products.

The prospects of industrial waste management in a low-carbon economy will be determined by enterprises' ability to deploy sorting, chemical stabilization, metal recovery, and mineralization. Ukraine has the opportunity to embed such solutions in its post-war recovery programmes rather than reproducing outdated production schemes. Priority should go to technologies that simultaneously reduce emissions, decrease local pollution, improve resource efficiency, and generate higher-value-added products[21].

The prospects of carbon capture in a low-carbon economy will be determined by enterprises' ability to deploy amine absorption, adsorption, and membrane or cryogenic separation. Ukraine has the opportunity to embed such solutions in its post-war recovery programmes rather than reproducing outdated production schemes. Priority should go to technologies that simultaneously reduce emissions, decrease local pollution, improve resource efficiency, and generate higher-value-added products[22].

[21] World Energy Transitions Outlook 2024: 1.5 °C Pathway. Abu Dhabi : International Renewable Energy Agency, 2024. URL: https://www.irena.org/publications/2024/Nov/World-Energy-Transitions-Outlook-2024 (date of access: 20.07.2026).

[22] Decarbonisation Roadmap for the Contracting Parties of the Energy Community : General Policy Guidelines 01/2021/MC-EnC. *Energy Community.* 2021. URL: https://www.energy-community.org/dam/jcr:45eab70a-051a-41be-a530-864adb2a669b/19thMC_Decarbonisation_Roadmap_301121.pdf (date of access: 20.07.2026).

The prospects of industrial electrification in a low-carbon economy will be determined by enterprises' ability to deploy induction, resistive, and plasma heating, and high-temperature heat pumps. Ukraine has the opportunity to embed such solutions in its post-war recovery programmes rather than reproducing outdated production schemes. Priority should go to technologies that simultaneously reduce emissions, decrease local pollution, improve resource efficiency, and generate higher-value-added products.

The prospects of circular chemistry in a low-carbon economy will be determined by enterprises' ability to deploy the regeneration of solvents, acids, alkalis, and catalysts, together with industrial symbiosis. Ukraine has the opportunity to embed such solutions in its post-war recovery programmes rather than reproducing outdated production schemes. Priority should go to technologies that simultaneously reduce emissions, decrease local pollution, improve resource efficiency, and generate higher-value-added products.

Green metallurgy is of particular importance for Ukraine. Shifting from the blast-furnace/converter route to direct hydrogen-based iron reduction and electric-arc melting can substantially reduce the carbon intensity of steel. Studies for post-war Ukraine show that combining renewable electricity, green hydrogen, and modern logistics could establish a new competitive model for the metallurgical sector[23].

Carbon capture should primarily be considered for process emissions that are difficult to avoid through technological substitution. Amine absorption is a mature method, but it requires substantial heat for solvent regeneration. Solid sorbents, membranes, and mineralization can complement this approach. What matters most is demonstrating genuine, long-term emission reductions rather than merely shifting CO_2 between streams.

The principles of green chemistry require preventing waste formation at the process-design stage, using safer substances, improving atom efficiency, and favouring renewable feedstocks. For Ukrainian industry, this means shifting from end-of-pipe pollution control to redesigning production itself.

Industrial decarbonization is therefore a systemic change in how materials are produced. It requires low-carbon energy, new reagents and catalysts, closed water and feedstock cycles, accurate emissions accounting, and the training of specialists. Chemistry provides the scientific basis for each of these directions.

[23] Devlin A., Mykhnenko V., Zagoruichyk A., Salmon N., Soldak M. Techno-economic optimisation of steel supply chains in the clean energy transition: A case study of post-war Ukraine. *Journal of Cleaner Production.* 2024. Vol. 466. Art. 142675. DOI: 10.1016/j.jclepro.2024.142675

CONCLUSIONS

Chemical technologies underpin Ukraine's transition to green energy and low-carbon industry. They enable the creation of photovoltaic materials, batteries, electrolyzers, fuel cells, biofuels, and purification systems. Their sustainability depends on the full life cycle, the safety of materials, and the possibility of reuse.

The most promising directions for Ukraine are combining renewable electricity with hydrogen technologies, developing biomethane, expanding energy storage, and electrifying thermal processes. At the same time, water resources, critical materials, infrastructure security, and future waste streams must be taken into account.

In industry, the greatest effect can be achieved through green metallurgy, a reduced clinker factor in cement, green ammonia, the catalytic destruction of N_2O, heat integration, the circular use of feedstocks, and the capture of unavoidable process emissions.

Post-war recovery offers an opportunity to embed modern low-carbon solutions from the outset. This requires a coordinated national policy, investment, scientific research, laboratory infrastructure, and the training of specialists in chemistry, materials science, energy, and industrial ecology.

SUMMARY

This section examines the chemical foundations of Ukraine's sustainable development in the context of green energy and industrial decarbonization. It shows that chemical processes and materials – semiconductors, electrolytes, catalysts, membranes, and sorbents – form the scientific basis for the transition to a low-carbon economic model. The chemical foundations of solar, wind, hydrogen, battery, biogas, and other forms of green energy are analysed against the targets of the National Energy and Climate Plan (an increase in the renewable share from ≈10% to ≥27% and a 65% cut in greenhouse gas emissions by 2030). The section reviews technological pathways for decarbonizing energy-intensive industries – ferrous metallurgy, cement and ammonia production, nitric acid, glass and ceramics – presenting specific CO2 emission figures and reduction benchmarks. The principles of green chemistry and the circular economy are substantiated as a basis for industrial modernization. It is shown that combining renewable electricity with hydrogen technologies, green metallurgy, and the capture of unavoidable process emissions could deliver the greatest benefit for Ukraine. The role of post-war recovery as an opportunity to embed modern low-carbon solutions from the outset is emphasized.

Bibliography

1. Про затвердження Національного плану дій з відновлюваної енергетики на період до 2030 року та плану заходів з його виконання : розпорядження Кабінету Міністрів України від 13 серпня 2024 року № 761-р. *Законодавство України :* база даних / Верховна Рада України. URL: https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/761-2024-%D1%80 (дата звернення: 20.07.2026).

2. Про схвалення Національного плану з енергетики та клімату на період до 2030 року : розпорядження Кабінету Міністрів України від 25 червня 2024 року № 587-р. *Законодавство України :* база даних / Верховна Рада України. URL: https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/587-2024-%D1%80 (дата звернення: 20.07.2026).

3. Стратегія низьковуглецевого розвитку України до 2050 року. Київ, 2018. URL: https://mepr.gov.ua/wp-content/uploads/2023/07/LEDS_ua_last.pdf (дата звернення: 20.07.2026).

4. Decarbonisation Roadmap for the Contracting Parties of the Energy Community : General Policy Guidelines 01/2021/MC-EnC. *Energy Community.* 2021. URL: https://www.energy-community.org/dam/jcr:45eab70a-051a-41be-a530-864adb2a669b/19thMC_Decarbonisation_Roadmap_301121.pdf (date of access: 20.07.2026).

5. Devlin A., Mykhnenko V., Zagoruichyk A., Salmon N., Soldak M. Techno-economic optimisation of steel supply chains in the clean energy transition: A case study of post-war Ukraine. *Journal of Cleaner Production.* 2024. Vol. 466. Art. 142675. DOI: 10.1016/j.jclepro.2024.142675

6. Kudria S., Ivanchenko I., Tuchynskyi B., Petrenko K., Karmazin O., Riepkin O. Resource potential for wind-hydrogen power in Ukraine. *International Journal of Hydrogen Energy.* 2021. Vol. 46. Issue 1. P. 157–168. DOI: 10.1016/j.ijhydene.2020.09.211

7. REmap 2030: Renewable Energy Prospects for Ukraine. Abu Dhabi : International Renewable Energy Agency, 2015. URL: https://www.irena.org/-/media/Files/IRENA/Agency/Publication/2015/Apr/IRENA_REmap_Ukraine_paper_2015.pdf (date of access: 20.07.2026).

8. Strielkowski W. Efficient low-carbon development in green hydrogen and ammonia economy: a case of Ukraine. arXiv. 2025. arXiv:2503.22326. URL: https://arxiv.org/abs/2503.22326 (date of access: 20.07.2026).

9. Ukraine Energy Profile. International Energy Agency. Paris, 2020. URL: https://www.iea.org/reports/ukraine-energy-profile (date of access: 20.07.2026).

10. World Energy Transitions Outlook 2024: 1.5 °C Pathway. Abu Dhabi : International Renewable Energy Agency, 2024. URL: https://www.irena.

org/publications/2024/Nov/World-Energy-Transitions-Outlook-2024 (date of access: 20.07.2026).

11. Decarbonization of Ukraine's steel industry: the European way. GMK Center. 2025. URL: https://gmk.center/en/posts/decarbonization-of-ukraine-s-steel-industry-the-european-way/ (date of access: 20.07.2026).

12. Striving for Access, Security, and Sustainability: Ukraine's Transition to a Modern and Decentralized Energy System. *Center for Strategic and International Studies.* 2026. URL: https://www.csis.org/analysis/striving-access-security-and-sustainability (date of access: 20.07.2026).

13. Ukraine: National Hydrogen Strategy Overview. *Green Hydrogen Organisation.* URL: https://gh2.org/countries/ukraine (date of access: 20.07.2026).

14. Snapshot: Ukrainian Renewables Market. *German-Ukrainian Energy Partnership.* 2025. URL: https://energypartnership-ukraine.org/fileadmin/ukraine/media_elements/250131_Snapshot_Renewables_Market_Ukraine.pdf (date of access: 20.07.2026).

15. Marmier A. Decarbonisation options for the cement industry. Luxembourg : Publications Office of the European Union, 2023. JRC131246. URL: https://publications.jrc.ec.europa.eu/repository/bitstream/JRC131246/JRC131246_01.pdf (date of access: 20.07.2026).

Information about the author:
Kochubei Olena,
Doctor of Philosophy,
Lecturer at the Department of Biology and Chemistry
Uman National University
1, Instytutska Street, Uman, Ukraine

CHAPTER 25

PERFORMANCE PROPERTIES AND BIODEGRADATION OF BIOPLASTIC FILM MATERIALS

Krykhovets Oleksandra
DOI https://doi.org/10.30525/978-9934-26-714-7-25

INTRODUCTION

Polymer film materials have become virtually indispensable to the modern packaging industry due to their combination of functionality, processability, and cost-effectiveness[1]. Along with their undeniable technological advantages, the intensive use of synthetic polymers has led to one of the most pressing environmental problems of our time. According to estimates by international organizations, global plastic production already exceeds 400 million metric tons annually, with the packaging industry remaining the largest consumer of these materials. A distinctive feature of packaging materials is their extremely short "servicelife": most products are used only once, after which they become waste[2]. As a result, packaging generates the largest stream of plastic waste among all areas of polymer use and is one of the key sources of anthropogenic pressure on the environment.

Despite continuous improvements in sorting and recycling systems, most plastic waste is still not being recycled. Significant amounts of packaging end up in municipal solid waste landfills or directly in the natural environment, where traditional polymers can persist for decades or even centuries. The high chemical stability of polyethylene, polypropylene, polyethylene terephthalate, and other synthetic polymers – which is an advantage during use – becomes one of the main causes of their accumulation in natural ecosystems once their life cycle ends. As a result, plastic waste pollutes soil, surface water, and marine waters, negatively impacts biodiversity, and places an additional burden on waste management systems[3].

[1] Geyer R., Jambeck J. R., Law K. L. Production, use, and fate of all plastics ever made. Science Advances. 2017. Vol. 3. № 7. Art. e1700782. DOI: 10.1126/sciadv.1700782

[2] Letcher T. M. Plastic Waste and Recycling: Environmental Impact, Societal Issues, Prevention, and Solutions. London : Academic Press, 2020. 686 p. DOI: 10.1016/C2018-0-01939-8

[3] Plastic Industry 2026. *ReportLinker.* URL: https://www.reportlinker.com/market-report/Plastic/6347/Plastic

The problem of microplastic formation is of particular concern. Under the influence of solar radiation, mechanical abrasion, temperature fluctuations, and other environmental factors, polymeric materials gradually break down into small particles that circulate in natural ecosystems for a long time[4]. Unlike biological decomposition, this type of degradation does not result in the complete mineralization of the polymer but merely leads to its fragmentation. Microplastics accumulate in water bodies, bottom sediments, soils, and living organisms, becoming part of food chains. Recent studies indicate their presence in drinking water, atmospheric air, seafood, and other food products, leading to increased concern about potential risks to human health.

An additional environmental concern is the presence of functional additives in polymer materials that provide the necessary technological properties of the packaging. These include plasticizers, stabilizers, antioxidants, dyes, flame retardants, and other auxiliary components. As polymers age or degrade, some of these substances may migrate into the environment or come into direct contact with food products. That is why modern safety assessments of packaging materials encompass not only an analysis of the polymer matrix but also an investigation of the behavior of functional additives throughout the entire life cycle of the packaging.

The problem of plastic waste is viewed today not only as an environmental issue, but also as an economic and resource-related one. The loss of materials following the single-use of packaging is accompanied by significant expenditures of natural resources, energy, and financial resources invested in the production of polymer products. In this regard, modern environmental policy is increasingly focused on the principles of the circular economy, which aim to minimize waste generation, reuse materials, recycle them, and gradually reduce the use of fossil-based raw materials. The implementation of these principles has become one of the key priorities of the European Green Deal, which aims to reduce the use of virgin polymers and promote the adoption of alternative, environmentally safe materials[5]. Alongside improvements in recycling technologies, one of the most important areas of development in modern materials science is the creation of new biopolymer materials capable of providing the necessary performance characteristics during use and minimizing the negative impact on the environment at the end of a product's life cycle[6]. The use of bioplastics is

[4] Fredi G., Dorigato A. Recycling of bioplastic waste : A review. Advanced Industrial and Engineering Polymer Research. 2021. Vol. 4. № 3. P. 159–177. DOI: 10.1016/j.aiepr.2021.06.006

[5] The European Green Deal / European Commission. URL: https://commission.europa.eu/strategy-and-policy/priorities-2019-2024/european-green-deal_en

[6] Niaounakis M. Recycling of biopolymers – the patent perspective. European Polymer Journal. 2019. Vol. 114. P. 464–475. DOI: 10.1016/j.eurpolymj.2019.02.027

a promising approach, as they combine the potential to reduce dependence on fossil-based raw materials with the potential to minimize the negative impact of packaging waste on the environment. In recent years, biopolymer packaging materials have become one of the most dynamic areas of research in the fields of materials science, food technology, and polymer chemistry, as evidenced by a significant number of review articles published in highly ranked international journals.

At the same time, the term “bioplastic” is often interpreted in different ways. In scientific literature, bioplastics are defined as polymeric materials that meet at least one of two criteria: they are made entirely or partially from renewable biological raw materials, or they are capable of biodegrading under appropriate conditions. Thus, bio-based and biodegradable are not synonymous terms. A material may be synthesized from plant-based raw materials but not decompose in the natural environment, or conversely, be produced from petrochemical raw materials yet completely biodegrade under the action of microorganisms.

According to the current classification, bioplastics are divided into three main groups. The first group includes bio-based and biodegradable polymers, the most common of which are polylactic acid (PLA), polyhydroxyalkanoates (PHA), thermoplastic starch (TPS), cellulose-based materials, and polybutylene succinate (PBS). The second group consists of biodegradable polymers of petrochemical origin, primarily polybutyrate-adipate-terephthalate (PBAT) and polycaprolactone (PCL). The third group includes bio-based but non-biodegradable materials, such as bioPE, bioPET, and bioPP, which help reduce the use of fossil-based raw materials but behave similarly to traditional polyolefins at the end of their useful life. This classification is important for selecting the optimal disposal strategy and assessing the environmental performance of a specific packaging material[7].

Despite significant progress in the development of biopolymer materials, their share of global plastics production remains relatively small for now. The main factors hindering the large-scale adoption of bioplastics include high production costs, dependence on the cost of biological feedstocks, the difficulty of scaling up certain synthesis technologies, and insufficient mechanical and barrier properties compared to traditional polymer materials. At the same time, most analytical forecasts indicate steady growth in the global bioplastics market, driven by stricter environmental requirements, advances in biosynthesis technologies, and increasing demand for environmentally friendly

[7] European Bioplastics. Bioplastics: Facts and Figures. URL: https://docs.european-bioplastics.org/publications/EUBP_Facts_and_figures.pdf

packaging. Despite significant progress in the development of biopolymer materials, the key prerequisite for their widespread adoption remains ensuring a set of performance characteristics that are on par with those of traditional polymers. Packaging film must not only meet environmental requirements but also effectively fulfill its primary function – ensuring that product quality is maintained throughout the entire period of transportation, sale, and consumption. That is why modern research on bioplastics is increasingly focused on a comprehensive assessment of the materials' functional properties. Unlike traditional polymers, most bioplastics are characterized by a more complex structural organization and a significantly stronger dependence of their properties on operating conditions. While polyethylene or polypropylene films exhibit relatively stable characteristics across a wide range of temperatures and humidity levels, biopolymer materials can significantly alter their behavior when exposed to moisture, temperature fluctuations, or prolonged contact with food products. It is precisely this characteristic that necessitates a comprehensive study of performance characteristics as early as the material development stage, since the environmental benefits do not compensate for the loss of packaging functionality[8].

Among the wide range of biopolymer materials, composite systems based on starch have attracted particular attention from researchers in recent years. Combining starch with other polymers, particularly polyvinyl alcohol (PVA), holds promise for the development of environmentally safe film materials, as it allows for the combination of the good performance characteristics of synthetic polymers with the high biodegradability of natural polysaccharides. Recent review studies note that PVA/starch composites are among the most intensively studied materials for food packaging due to the high compatibility of their components, the possibility of structural modification, and a wide range of functional properties[9].

Polyvinyl alcohol is one of the few synthetic polymers that combine high film-forming ability, water solubility, biocompatibility, and the potential for biodegradation under appropriate conditions. Due to the large number of hydroxyl groups, PVA molecules easily form a dense network of intermolecular hydrogen bonds, which ensures good adhesion between polymer chains and high compatibility with natural polysaccharides, proteins, nanofillers, and functional additives. One of the key advantages of PVA is its high barrier properties against oxygen and other gases under conditions of low relative humidity. For food

[8] Ashter S. A. Introduction to Bioplastics Engineering. 1st ed. Oxford : William Andrew, 2016. 320 p.

[9] Chi H., Xu K., Wu X., Chen S. Preparation and characterization of biodegradable heat-seal packaging films based on corn starch and poly(vinyl alcohol). Journal of Polymers and the Environment. 2012. Vol. 20. № 3. P. 810–816. DOI: 10.1007/s10924-012-0438-2

packaging, this characteristic is of fundamental importance, since it is precisely oxygen permeation that often determines the rate of fat oxidation, color change, loss of aroma, and a shortened shelf life of products. In addition, polyvinyl alcohol forms transparent, smooth, and uniform films that are highly printable, ensure high-quality application of informational labeling, and meet the modern aesthetic requirements of the packaging industry. As a result, materials based on it are being actively researched not only as traditional packaging films but also as a basis for active and smart packaging.

Along with its numerous advantages, polyvinyl alcohol also has certain limitations, the main one being its high hygroscopicity. That is why current research is primarily focused on improving the moisture resistance of PVA through chemical cross-linking of the polymer matrix, the use of nanofillers, the incorporation of hydrophobic components, or the creation of multicomponent polymer composites. The most effective approach is considered to be the combination of PVA with natural biopolymers, which allows for simultaneously improving the material's performance characteristics and enhancing its environmental friendliness.

The compatibility of PVA and starch is largely due to the ability to form a well-developed system of hydrogen bonds between their molecules. This ensures the formation of a homogeneous polymer matrix, improves mechanical properties, promotes the uniform distribution of plasticizers and functional additives, and creates the conditions for effective modification of the material's properties. Recent reviews emphasize that it is precisely the intermolecular interaction between PVA and starch that is one of the key factors determining the physical and mechanical properties, gas permeability, transparency, and stability of composite films[10].

Another equally important characteristic of composite materials based on PVA and starch is their enhanced biodegradability. Starch is readily utilized by microorganisms as a carbon source, which promotes the gradual breakdown of the polymer matrix and facilitates the subsequent degradation of PVA. At the same time, the rate of this process is determined not only by the ratio of components but also by the degree of polymer crystallinity, the presence of cross-linking agents, film thickness, temperature, humidity, and the composition of microbial communities. Thus, the biodegradation of composite materials is a complex, multifactorial process that requires comprehensive experimental study[11].

[10] Mao L., Imam S. H., Gordon S., Cinelli P., Chiellini E. Extruded cornstarch-glycerol-polyvinyl alcohol blends: mechanical properties, morphology, and biodegradability. Journal of Polymers and the Environment. 2000. Vol. 8. № 4. P. 205–211. DOI: 10.1023/A:1015201928153

[11] Westlake J. R., Tran M. W., Jiang Y., Zhang X., Burrows A. D., Xie M. Biodegradable biopolymers for active packaging: demand, development and directions. Sustainable Food Technology. 2023. Vol. 1. № 1. P. 50–72. DOI: 10.1039/D2FB00004K

In light of this, composite films based on polyvinyl alcohol and starch are currently considered one of the most promising platforms for creating a new generation of environmentally safe packaging. At the same time, the effectiveness of their practical application is determined not by individual characteristics, but by a balanced combination of mechanical strength, barrier properties, stability during use, and the ability to undergo controlled biodegradation after the product's end-of-life. That is why a comprehensive study of the performance characteristics and biodegradation of such materials is one of the priority areas of modern materials science and packaging technologies

The aim of this study is to investigate the performance characteristics and biodegradability of bioplastic packaging films, which will allow for an objective assessment of their practical suitability as an alternative to traditional polymeric materials and determine the prospects for their widespread adoption in modern packaging technologies.

1. Materials and Methods

To produce the experimental bioplastic films, polyvinyl alcohol (Polyviol G 04/140) was used as the main film-forming polymer, along with water-soluble corn starch, glycerin (FS 42-2202-84) as a plasticizer, and sodium tetraborate ($Na_2B_4O_7 \cdot 10H_2O$, analytical grade) as a cross-linking agent and functional additive. The polymer composition was prepared in an aqueous medium. Polyvinyl alcohol was dissolved in water under continuous stirring while simultaneously heating until the granules were completely dissolved and a homogeneous, transparent solution was formed. Afterward, cornstarch was added to the system and gelatinized at a temperature of 358–363 K until a homogeneous polymer matrix formed. The resulting composition was cooled, and glycerin and sodium tetraborate were added. Glycerin was used to increase the elasticity and reduce the brittleness of the films, while sodium tetraborate provided partial cross-linking of the polymer network through the formation of additional intermolecular bonds between the hydroxyl groups of PVA and starch, which helped stabilize the composition's structure.

The film samples were prepared by solution casting. The polymer composition was evenly applied to a horizontal glass substrate and dried at room temperature until the solvent had completely evaporated.

Before conducting physical and mechanical tests, all samples were conditioned under laboratory conditions to stabilize their moisture content and geometric parameters. Film thickness was determined using an IZV-2 thickness gauge. For each sample, measurements were taken at a minimum of five different points, after which the arithmetic mean of the thickness was calculated. Multi-point thickness measurement allowed for possible heterogeneity in the polymer

composition to be accounted for and increased the reliability of subsequent mechanical and barrier tests.

The mechanical properties of the bioplastic films were determined in accordance with the requirements of DSTU EN ISO 8067:2018[12]. Rectangular strips 15 mm wide were cut from each sample to ensure uniform testing conditions. Prior to testing, the samples were conditioned at a temperature of (23 ± 2) °C and a relative humidity of (50 ± 5)% for at least 48 hours. The tests were conducted on a universal tensile testing machine with an initial distance between the grips of 50 mm. During tensile testing, the maximum tensile load, tensile strength, and relative elongation at break were determined.

The tensile strength σ (MPa) is calculated using the following formula:

$$\sigma = \frac{P}{S},$$

where: σ – tensile strength, MPa;

P – maximum tensile force, N;

S – initial cross-sectional area, mm².

The relative elongation at break (ε, %) was determined using the formula:

$$\varepsilon = \Delta l / l_0,$$

where: $\Delta l = l - l_0$;

l – length of the specimen at the moment of break, mm;

l_0 – initial length of the specimen, mm.

For each composition, at least five samples were analyzed, after which the mean value and standard deviation were determined.

The chemical structure of the bioplastic films was analyzed using Fourier transform infrared (FTIR) spectroscopy. The spectra were recorded on a Spectrum Two FT-IR spectrometer (PerkinElmer, USA) in the wavenumber range of 4000–400 cm^{-1}.

Water absorption was determined in accordance with the requirements of ISO 62:2008[13]. The samples were first dried to a constant mass, then completely immersed in distilled water at a temperature of 293 K. At specified time intervals, the samples were removed, excess water was blotted from the surface with filter paper, and the samples were weighed on an analytical balance. The

[12] DSTU EN ISO 8067:2018. Materialy politmerni porysti elastychni. Metod vyznachennia mitsnosti pid chas rozdyrannia [Flexible cellular polymeric materials – Determination of tear strength (EN ISO 8067:2018, IDT; ISO 8067:2018, IDT)]. Kyiv, 2018.

[13] International Organization for Standardization (ISO). ISO 62:2008. Plastics – Determination of water absorption. Geneva : ISO, 2008.

study was continued until equilibrium mass was reached or the film lost its integrity.

Water absorbtion (Wt, %) was determined using the following formula:

$$\text{Wt}\ (\%) = \frac{\text{mt} - \text{m0}}{\text{m0}} \times 100\%,$$

where m_0 is the mass of the sample before the experiment began, and mt is the mass after soaking in water for a time t. The results obtained were used to evaluate the moisture resistance and stability of the polymer structure. The methodology complies with the requirements of ISO 62 for determining the water absorption of polymeric materials.

The biodegradability of the films was evaluated using the soil burial test[14]. Samples measuring 15 × 100 mm were placed in mesh polymer containers and buried in a soil mixture of chernozem and loam to a depth of approximately 2 cm. Soil moisture was maintained at 40–50%, and the tests were conducted at a temperature of 293 K.

At set time intervals, the samples were removed, cleaned of soil residues, dried to a constant mass, and weighed. The degree of biodegradation was determined based on mass loss:

$$\text{Biodegradation}\ (\%) = \frac{\text{mt} - \text{m0}}{\text{m0}} \times 100\%,$$

where m_0 is the mass of the sample before the experiment began and mt is the mass after exposure in the soil.

In addition to changes in mass, morphological changes on the surface, the appearance of cracks, color changes, and loss of mechanical integrity were assessed, which allowed for a comprehensive characterization of the biodegradation process.

2. Results and Discussion

For this study, we selected film materials that are commercially used to manufacture flexible food packaging in retail chains in Ukraine (samples № 1, № 2, and № 3). These bioplastic films are marketed as starch-based biodegradable materials. We produced experimental films containing starch, the water-soluble polymer polyvinyl alcohol, glycerin as a plasticizer, and

[14] International Organization for Standardization (ISO). ISO 20200:2023. Plastics – Determination of the degree of disintegration of plastic materials under simulated composting conditions. Geneva : ISO, 2023.

sodium tetraborate as a functional additive (samples № 4, № 5, № 6), similar to the previous study[15]. The experimental films were prepared by casting from a solution. During the drying process, the samples formed with a fairly uniform structure and stable thickness across the entire surface. After the completion of the structure-forming processes and the complete removal of moisture, the films easily separated from the glass substrate, indicating their integrity, sufficient mechanical stability, and suitability for further physicochemical studies. To stabilize the film structure, the samples were held for 7 days at 293 K (sample 4), for 60 min at 393 K (sample 5), and for 1 hour at 423 K (sample 6) (Table 1).

Table 1

Composition and average thickness of films

№ samples	Compositionoffilmsamples, % bymass				Stabilisation temperature, K	Film thickness, mm
	Starch	PVA	Glycerole	$Na_2B_4O_7$		
1	–	–		–	293	0,0150
2	–	–		–	293	0,0161
3	–	–		–	293	0,0172
4	10	40	40	10	293	0,0735
5	10	40	40	10	393	0,0661
6	10	40	40	10	4 232	0,0621

The mechanical properties of the resulting film materials were evaluated using a universal tensile testing machine. During the testing, two main parameters were determined: the tensile strength and the elongation of the samples under tension. The results of the tensile strength tests for commercial films and experimental films containing starch, PVA, borax, and glycerin are shown in Fig. 1. The test results indicate that the tensile strength values for commercial film materials differ only slightly from one another. Higher tensile strength values were observed for the experimental films. This is explained by the fact that the experimental samples have greater thickness and, consequently, a larger cross-sectional area, and are therefore capable of withstanding a greater load before failure. Heat treatment of the experimental films increases their tensile strength.

At the same time, tensile strength alone is not always a sufficiently objective indicator of the strength of film materials, since it depends to a large

[15] Krykhovets O., Slobodyanyk V. Preparation and characteristics of films based on polyvinyl alcohol and starch for environmentally friendly packaging. Advances in Science and Technology. 2025. Vol. 162. P. 101–108. DOI: 10.4028/p-eR3mdB

extent on the geometric parameters of the sample, primarily its thickness and width. Therefore, the primary characteristic of film strength is considered to be the stress at break, which takes into account the cross-sectional area of the material. This parameter allows for a more accurate assessment of the material's actual strength, regardless of the dimensions of a specific specimen. Tensile stress is defined as the ratio of the tensile load acting on the specimen at the moment of failure to the cross-sectional area of the film. The tensile strength of the biofilms is shown in Fig. 2. For the three types of commercial biofilms, the tensile strength values differ only slightly. The experimental biofilms, stabilized at 393 K and 433 K, are stronger than the thermally untreated ones.

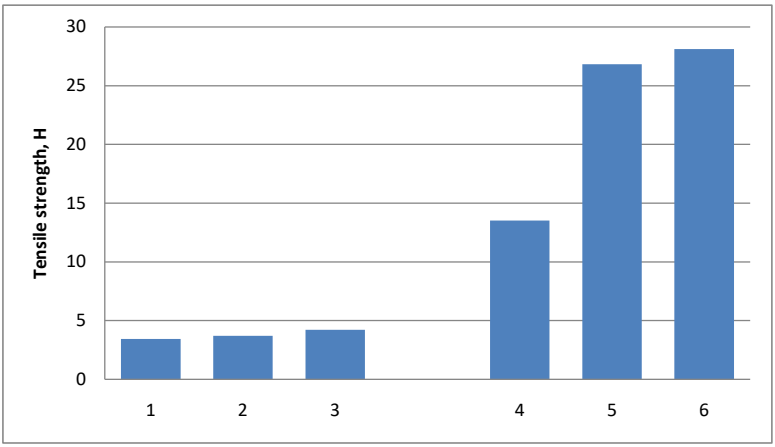


Fig. 1. Tensile strength of bioplastic films: 1, 2, 3 – industrial bioplastic films; 4, 5, 6 – experimental bioplastic films (sample numbers and composition according to Table 1)

The value of relative elongation at break characterizes the ability of a film material to deform under tensile loading until failure and allows for an assessment of the elasticity, flexibility, and deformability of the films under study. Fig. 3 shows the variation in relative elongation at break for the film materials under study. Analysis of the results shows that the trend in this parameter differs from that observed for tensile strength. While the strengthening of the polymer structure was the primary factor affecting tensile stress, the material's ability to retain its elasticity during deformation plays a more significant role in determining relative elongation at break.

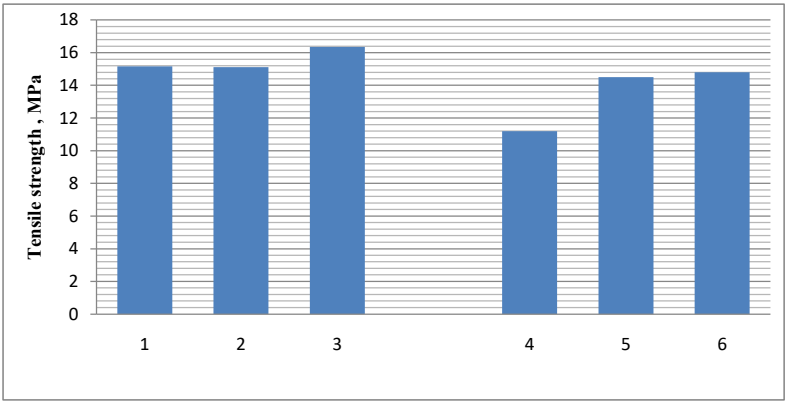


Fig. 2. Tensile strength at break of bioplastic films: 1, 2, 3 – commercial bioplastic films; 4, 5, 6 – experimental bioplastic films

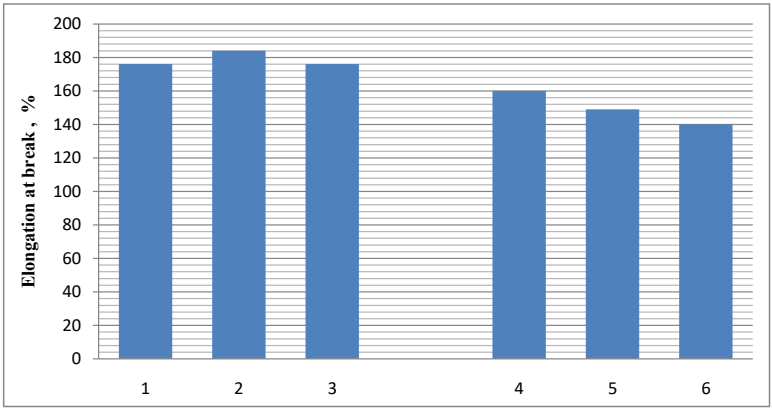


Fig. 3. Variation in relative elongation at break of bioplastic films: 1, 2, 3 – commercial bioplastic films; 4, 5, 6 – experimental bioplastic films

The results of the mechanical tests conducted – specifically, the determination of tensile strength, tensile deformation characteristics, and the calculation of tensile stress at break – demonstrate the potential of experimental film materials based on polyvinyl alcohol, cornstarch, glycerin, and borax for use in the packaging industry. Thanks to their combination of sufficient strength, elasticity, and environmental friendliness, such materials can be considered a potential alternative to traditional polymer packaging films, particularly for

food packaging, as well as for encapsulating or providing a protective coating for fresh fruits and vegetables. Of particular importance is the fact that an increase in tear strength and tensile stress at break was observed for the thermally stabilized films. This indicates improved cross-linking of the polymer matrix.

The spectra of the studied film materials, obtained in the wavenumber range from 400 to 4 000 cm^{-1}, are shown in Figs. 4 and 5. The FTIR spectra of commercial bioplastic films confirm that the films under study are composites based on thermoplastic starch modified with polymer additives (Fig. 4).

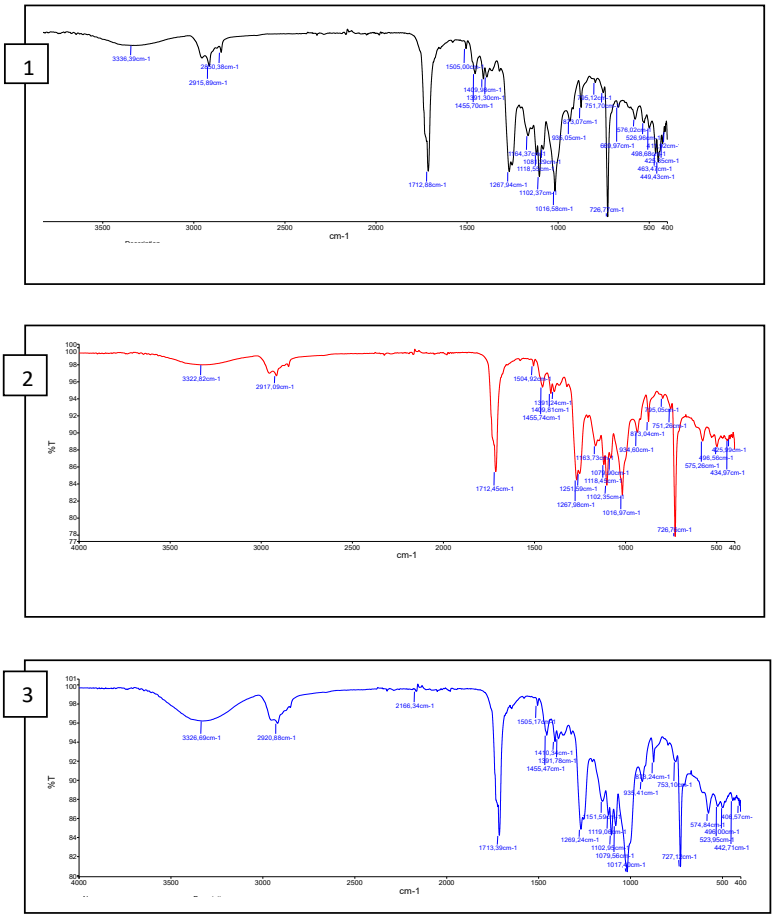


Fig. 4. Spectra of industrial bioplastic films
(1 – Sample № 1; 2 – Sample № 2; 3 – Sample № 3)

The FTIR spectrum of Sample № 2 most closely matches the spectral profile of moderately modified starch. This may indicate that primarily simple plasticizers, such as glycerin or sorbitol, were used to form this material, and that the amount of foreign polymeric components was minimal. The FTIR spectrum of sample № 3 is characterized by the highest intensity of absorption bands in the 1 100–900 cm^{-1} region compared to the other samples studied. This may indicate an increased content of the polysaccharide phase, specifically amylopectin, in the material's structure.

The results of the infrared spectroscopy analysis of the experimental biofilms showed that the main characteristic absorption bands in the spectra of samples 4, 5, and 6 correspond to the spectral features of polyvinyl alcohol and starch. This indicates that PVA remains the main structure-forming component of the studied films. The presence of borax and heat treatment contribute to better cross-linking of the polymer matrix.

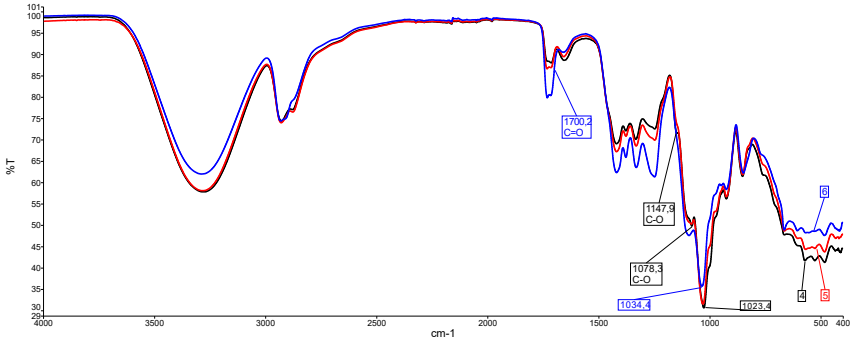


Fig. 5. Spectra of polyvinyl alcohol- and starch-based films (4 000–400 cm^{-1} range)

Studying the disintegration and biodegradation of film materials is an essential step in assessing their environmental suitability and involves the following stages.

1. Characterization of the chemical composition of the bioplastic under study.

According to the results of IR spectroscopy, films № 1, № 2, and № 3 are made from starch. The filler content in these materials is negligible. IR spectroscopy revealed the use of thermoplastic and modified starch for the production of durable packaging materials. The experimental film materials were formulated using polyvinyl alcohol – a water-soluble synthetic polymer that is widely used in various fields, particularly in medicine, and can also be

used as an approved food additive. Due to its water solubility, film-forming ability, and relative safety for living organisms, polyvinyl alcohol was selected as the main component of the polymer matrix. Glycerin, which has no harmful effects on living organisms, was added to the composition as a plasticizer. Starch, a naturally occurring polymer and a renewable resource, was also incorporated into the film materials. Starch is capable of decomposing through enzymatic processes or under composting conditions, which enhances the environmental sustainability of the resulting films. The minerals present in the film materials under study generally do not have a significant harmful effect on living organisms when found in low concentrations.

2. Material Characteristics.

Industrial-grade film materials are uniform in thickness and color. The high physical, chemical, and performance characteristics of these films, combined with the material's thinness, make them an economically viable packaging solution.

The experimental films were characterized by a virtually transparent structure, sufficient softness, elasticity, and uniformity. These properties indicate good compatibility of the main components of the composition and the system's ability to form a uniform film material. In terms of their physicochemical and performance characteristics, the experimental composite film materials – which, in addition to polyvinyl alcohol, contain starch, borax, and glycerin – may hold promise for eco-friendly packaging. These films retain a homogeneous structure, have a uniform thickness across the entire surface, and demonstrate sufficiently high tensile strength and elongation capacity. The combination of a synthetic polymer and a natural polymer component in the composition not only improves the material's properties but also reduces its production cost. In addition, the inclusion of starch enhances the films' environmental appeal, as it increases the proportion of renewable raw materials and potentially promotes the material's biodegradability.

3. Study of swelling and dissolution processes.

In the initial stage of assessing the environmental impact of bioplastic film materials, a study was conducted on their interaction with an aqueous environment. The solubility of the film samples was tested in distilled water at room temperature. This approach allowed for the evaluation of the materials' behavior under standard conditions without the influence of additional impurities, salts, or aggressive chemical agents. The temperature of the aqueous medium during the experiment was 293 K.

Figure 6 presents the results of the experimental study, which show the change in mass of the film materials after immersion in water at room temperature. For film samples № 1, № 2, and № 3, there was virtually no increase in mass during

the first few minutes of full contact with water. Weighing the samples after 1 day, 2 days, and 3 days in water revealed a slight increase in the mass of the films. For samples № 1 and № 2, a 10% increase in mass per day was recorded. Sample № 3 showed virtually no change in mass (a 5% increase).

When fully immersed in water at room temperature, the samples of experimental film materials – composed of PVA, starch, borax, and glycerin – exhibit a pronounced swelling process.

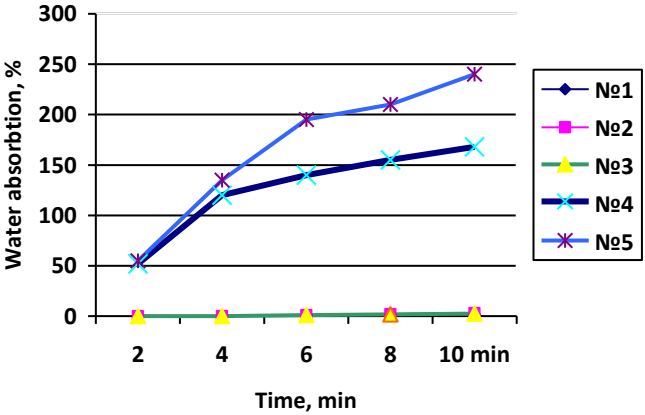


Fig. 6. Dependence of moisture content in films on water absorption time

This is accompanied by a significant increase in the mass of the film material, indicating active water absorption by the polymer matrix and deformation of the film (Fig. 7). This increase in mass indicates a higher ability of these films to adsorb and retain water compared to the other materials studied. This is likely due to the presence of hydrophilic components in the composition, specifically polyvinyl alcohol, starch, and glycerin, which contain functional groups capable of interacting with water molecules.



Fig. 7. Swelling of experimental films № 4 and № 5

4. Biodegradation of polyvinyl alcohol-based films.

To study the biodegradation of film materials, strips of commercial films (Nos. 1, 2, and 3) and experimentally produced films (Nos. 4, 5, and 6) were placed in special bags made of a material designed for polymer composting. The size of the holes in these bags was approximately 2 mm², which ensured contact between the film samples and the soil environment and microorganisms, while also allowing for the retrieval of any remaining material after the experiment was completed.

The bags containing the film samples were then placed in containers filled with a 5–6 cm layer of soil (a mixture of chernozem and clay loam) freshly collected from a suburban plot. The samples were then covered with an additional layer of soil at least 2 cm thick. This arrangement simulated the conditions under which the film material would be present in the soil and ensured its contact with moisture, air, and the soil microbiota. The layout of the samples in the soil is shown in Fig. 8.



Fig. 8. Containers with soil and biofilms

As early as 48 hours after the start of the study, it was found that samples № 1, № 2, and № 3 showed virtually no noticeable deformation. Samples № 4, № 5, and № 6 lost their original shape. This indicates the active onset of swelling, softening, and partial structural degradation of the film material under the influence of moisture and the soil environment. During the first three days in the soil environment, an increase in the mass of the film samples was observed, which was due to moisture absorption. For samples № 1, № 2, and № 3, the increase in mass was up to 10%. For samples № 4, № 5, and № 6, the level of water absorption in the soil reached 200–213% after just one day, and rose to 250–279% after two days.

After 48 hours of the soil burial test, samples № 1, № 2, and № 3 showed virtually no change in appearance. Film materials № 4, № 5, and № 6 underwent noticeable deformation, and their surface also changed (Fig. 9). The appearance

of pores, microcracks, and defects was observed, which increased over time. Such changes indicate a breach in the integrity of the polymer matrix and the development of material disintegration processes.

After two weeks of exposure to the soil environment, the mass of the samples remained unchanged for industrial films, while a decrease in mass was observed for the experimental film materials. During the soil burial test for films containing the synthetic polymer polyvinyl alcohol, the natural polymer cornstarch, borax, and glycerin, an increase in soil microflora activity was observed.

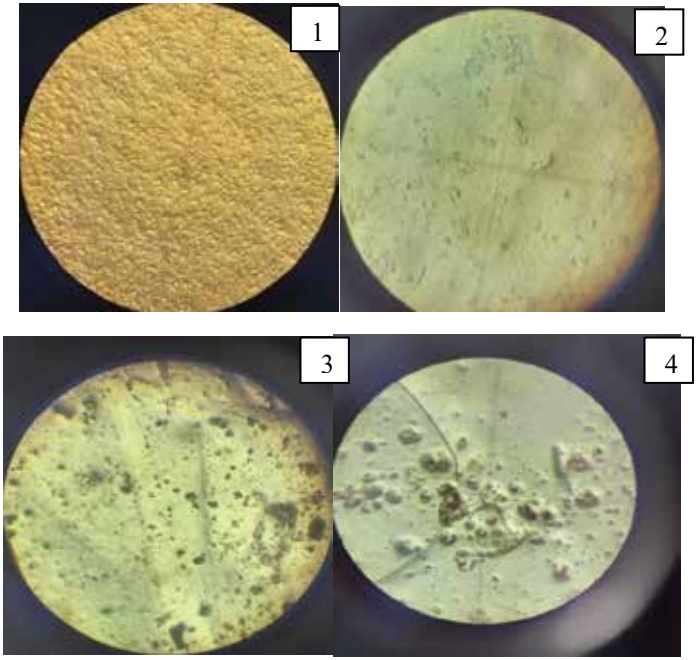


Fig. 9. Changes in the surface structure of films 5 and 6: 1, 2 – before the soil burial test; 3, 4 – 13 days after the soil burial test

It is soil microorganisms that play a key role in the breakdown of the biomaterial's organic matrix and participate in its biodegradation processes. During the experiment, the initially colorless experimental biofilms gradually took on various hues, including gray, greenish, and pink. Such color changes may indicate the formation, development, and spread of microbial colonies on the surface of the film material.

After eight weeks in a moist soil environment, the samples of industrial films underwent partial degradation: they lost their strength, and localized changes were visually observable. However, no disintegration or biodegradation of the starch-based industrial materials occurred during the experiment. According to the results of the eight-week soil burial test, the level of biodegradation of the experimental biofilms under study reached 90%. This indicates the high degradability of the resulting film materials in a soil environment and confirms their potential as environmentally friendly packaging materials.

Since the final stage of the life cycle of packaging materials is their disposal, one of the key tasks of modern materials science is the development of polymer composites capable of controlled biodegradation. The inclusion of biopolymer components in the polymer matrix helps increase the biodegradability of film materials and accelerate their degradation after the end of their service life. In particular, N. N. Nasir and S. A. Othman found that the addition of starch significantly increases the rate of biodegradation of polymer films[16], while M. C. Alvarado demonstrated a similar effect when using nanocellulose as a functional filler[17]. Our results are consistent with recent studies of composite films based on starch and polyvinyl alcohol and confirm that biopolymer components not only improve the material's environmental performance but also ensure its effective degradation in the soil environment

A study by O. Fedoryshyn et al. (2024)[18] of experimental and industrial films based on potato starch revealed increased microbiological activity on the surface of the materials after exposure to soil, indicating their capacity for effective biodegradation. Similar patterns were observed by V. Lebedev et al. (2022)[19], who confirmed that the addition of starch to a polymer composition accelerates the biodegradation of film materials without a significant loss of their functional properties during use.

CONCLUSIONS

Current research on bioplastic films is increasingly focused on a comprehensive assessment of their performance characteristics and end-of-life options to ensure

[16] Nasir N. N., Othman S. A. The physical and mechanical properties of corn-based bioplastic films with different starch and glycerol content. Journal of Physical Science. 2021. Vol. 32. № 3. P. 89–101. DOI: 10.21315/jps2021.32.3.7

[17] Alvarado M. C. Recent progress in polyvinyl alcohol (PVA)/nanocellulose composite films for packaging applications : A comprehensive review of the impact on physico-mechanical properties. Food Bioengineering. 2024. Vol. 3. № 2. P. 189–209. DOI: 10.1002/fbe2.12086

[18] Fedoryshyn O., Chervetsova V., Yaremkevych O., Skril Y., Khomyak S., Kohut F. A. Physico-chemical and microbiological characterization of starch-based biodegradable films. Chemistry & Chemical Technology. 2024. Vol. 18. № 3. P. 417–425. DOI: 10.23939/chcht18.03.417

[19] Lebedev V., Miroshnichenko D., Bilets D., Mysiak V. Investigation of hybrid modification of eco-friendly polymers by humic substances. Solid State Phenomena. 2022. Vol. 334. P. 154–161. DOI: 10.4028/p-gv30w7

a high level of functionality without compromising environmental benefits. An investigation of the mechanical properties of industrial packaging films used as flexible food packaging in retail stores, as well as experimental bioplastic films based on starch, polyvinyl alcohol, glycerin, and borax revealed approximately the same tensile strength values for all six bioplastic film samples. Industrial film samples are thinner and therefore their use is resource-efficient. The elongation at break for the films studied ranges from 136% to 184%, indicating sufficient elasticity of the materials.

The experimental films are moisture-sensitive, unlike commercial samples. Stabilizing the experimental film materials at temperatures of 393 K and 423 K helps strengthen the biomaterial.

The results obtained indicate that the use of sodium tetraborate as a cross-linking agent is an effective method for modifying compositions based on polyvinyl alcohol, cornstarch, and glycerin. Such modification enhances the chemical resistance, strength, and operational stability of the film materials without compromising their biodegradability. This paves the way for the application of the developed materials in both the packaging industry and the agricultural sector, where there is a growing need for environmentally safe polymeric materials.

Composite films based on polyvinyl alcohol and starch have significant potential for use in the production of biodegradable packaging materials, providing the necessary level of performance characteristics and enabling more environmentally sound waste management after the end of their useful life.

SUMMARY

The growing accumulation of plastic waste and increasing environmental requirements have intensified the search for sustainable alternatives to conventional petroleum-based packaging materials. Bioplastic film materials based on renewable polymers represent a promising solution because they combine reduced environmental impact with the potential for biodegradation after use. This study investigated composite films prepared from polyvinyl alcohol, corn starch, glycerol, and sodium tetraborate to evaluate their functional performance and biodegradation behaviour. The films were characterized by determining their thickness, tensile properties, water absorption, surface wettability, chemical structure using FTIR spectroscopy, and biodegradability under soil conditions. The incorporation of sodium tetraborate promoted the formation of a more stable polymer network, resulting in improved mechanical strength, enhanced chemical stability, and greater durability during service. At the same time, starch in the polymer matrix accelerated biodegradation while maintaining the functional properties required for packaging applications.

The obtained results demonstrate that optimizing the composition of PVA-starch composites enables a balance between mechanical performance, water resistance, and biodegradability, which is essential for sustainable packaging materials. The developed films exhibit considerable potential for use as environmentally friendly packaging materials and may also be applied in agricultural applications requiring controlled biodegradation.

Bibliography

1. Geyer R., Jambeck J. R., Law K. L. Production, use, and fate of all plastics ever made. *Science Advances*. 2017. Vol. 3. № 7. Art. e1700782. DOI: 10.1126/sciadv.1700782
2. Letcher T. M. Plastic Waste and Recycling: Environmental Impact, Societal Issues, Prevention, and Solutions. London : Academic Press, 2020. 686 p. DOI: 10.1016/C2018-0-01939-8
3. Plastic Industry 2026**.** *ReportLinker.* URL: https://www.reportlinker.com/market-report/Plastic/6347/Plastic (дата звернення: 28.07.2026).
4. Fredi G., Dorigato A. Recycling of bioplastic waste : A review. *Advanced Industrial and Engineering Polymer Research*. 2021. Vol. 4. № 3. P. 159–177. DOI: 10.1016/j.aiepr.2021.06.006
5. The European Green Deal / European Commission. URL: https://commission.europa.eu/strategy-and-policy/priorities-2019-2024/european-green-deal_en (дата звернення: 28.07.2026).
6. Niaounakis M. Recycling of biopolymers – the patent perspective. *European Polymer Journal*. 2019. Vol. 114. P. 464–475. DOI: 10.1016/j.eurpolymj.2019.02.027
7. European Bioplastics. *Bioplastics: Facts and Figures*. URL: https://docs.european-bioplastics.org/publications/EUBP_Facts_and_figures.pdf (дата звернення: 28.07.2026).
8. Ashter S alcohol blends: mechanical properties, morphology, and biodegradability. *Journal of Polymers and the Environment*. 2000. Vol. 8. № 4. P. 205–211. DOI: 10.1023/A:1015201928153
9. Westlake J. R., Tran M. W., Jiang Y., Zhang X., Burrows A. D., Xie M. Biodegradable biopolymers for active packaging: demand, development and directions. *Sustainable Food Technology*. 2023. Vol. 1. № 1. P. 50–72. DOI: 10.1039/D2FB00004K
10. DSTU EN ISO 8067:2018. *Materialy politmerni porysti elastychni. Metod vyznachennia mitsnosti pid chas rozdyrannia* [Flexible cellular polymeric materials – Determination of tear strength (EN ISO 8067:2018, IDT; ISO 8067:2018, IDT)]. Kyiv, 2018.

11. International Organization for Standardization (ISO). ISO 62:2008. *Plastics – Determination of water absorption*. Geneva : ISO, 2008.

12. International Organization for Standardization (ISO). ISO 20200:2023. *Plastics – Determination of the degree of disintegration of plastic materials under simulated composting conditions*. Geneva : ISO, 2023.

13. Krykhovets O., Slobodyanyk V. Preparation and characteristics of films based on polyvinyl alcohol and starch for environmentally friendly packaging. *Advances in Science and Technology*. 2025. Vol. 162. P. 101–108. DOI: 10.4028/p-eR3mdB

14. Nasir N. N., Othman S. A. The physical and mechanical properties of corn-based bioplastic films with different starch and glycerol content. *Journal of Physical Science*. 2021. Vol. 32. № 3. P. 89–101. DOI: 10.21315/jps2021.32.3.7

15. Alvarado M. C. Recent progress in polyvinyl alcohol (PVA)/ nanocellulose composite films for packaging applications: A comprehensive review of the impact on physico-mechanical properties. *Food Bioengineering*. 2024. Vol. 3. № 2. P. 189–209. DOI: 10.1002/fbe2.12086

16. Fedoryshyn O., Chervetsova V., Yaremkevych O., Skril Y., Khomyak S., Kohut F. A. Physico-chemical and microbiological characterization of starch-based biodegradable films. *Chemistry & Chemical Technology*. 2024. Vol. 18. № 3. P. 417–425. DOI: 10.23939/chcht18.03.417

17. Lebedev V., Miroshnichenko D., Bilets D., Mysiak V. Investigation of hybrid modification of eco-friendly polymers by humic substances. *Solid State Phenomena*. 2022. Vol. 334. P. 154–161. DOI: 10.4028/p-gv30w7

Information about the author:
Krykhovets Oleksandra,
Candidate of Chemical Sciences,
Associate Professor at the Department of Multimedia Technology
Lviv Polytechnic National University
12, Bandery Street, Lviv, Ukraine

CHAPTER 26

РОЗРАХУНКОВІ КОНТИНУУМ-МЕТОДИ ДЛЯ ВИВЧЕННЯ ХІМІЧНИХ ПРОБЛЕМ У РОЗЧИНІ (ЗА ДЖ. ТОМАЗІ)

Токар Андрій
DOI https://doi.org/10.30525/978-9934-26-714-7-26

ВСТУП

Комп'ютерна хімія[1] на сьогодні доволі активно займається вивченням різноманітних рідких систем. При цьому зовсім немає необхідності додатково підтверджувати цю зацікавленість, адже важливість рідин у хімії є настільки очевидною, що варто лише нагадати про значні успіхи у теорії конденсованих систем, які роблять ці розрахунки принципово можливими. Більш цікавим з цієї точки зору є огляд основних доступних нині підходів, оскільки із такого дослідження можна буде зробити висновок про базові тенденції у цій специфічній галузі комп'ютерної хімії, поставивши тим самим у правильну перспективу головну тему цього обговорення.

Різноманітні підходи, які варто скоріш розглядати як теоретичні (або розрахункові) наближення, можуть бути принципово зібрані у такі групи:

(**A**) методи, засновані на розробці та вдосконаленні фізичних функцій;

(**B**) методи, засновані на розробці комп'ютерної симуляції рідин;

(**C**) методи, що базуються на постійному (чи суцільному) розподілі розчинника;

(**D**) методи, що витікають із «супермолекулярного» (або кластерного) підходу до опису системи «розчинена речовина – розчинник».

Група (**A**) включає наближення, що засновані на так званому віріальному розширенні рівняння стану, а також описі кореляційних функцій за допомогою інтегрального рівняння або застосуванні теорії збурень стосовно простих систем, і деякі інші наближення.

[1] Felice R., Mayes M., Richard R., Williams-Young D., Chan G., de Jong W., Govind N., Head-Gordon M., Hermes M., Kowalski K., Li X., Lischka H., Mueller K., Mutlu E., Niklasson A., Pederson M., Peng B., Shepard R., Valeev E., Zimmerman P. A Perspective on Sustainable Computational Chemistry Software Development and Integration. *J. Chem. Theory Comput.* 2023. Vol. 19. № 20. P. 7056. https://doi.org/10.1021/acs.jctc.3c00419.

При цьому поле є об'єктом активного розгляду. Група (**B**) включає загальновідомий метод Монте-Карло, молекулярну динаміку та пов'язані з ними інші методи. У всіх цих випадках рідина описується як сукупність взаємодіючих молекул, а статистичний розподіл будь-якої властивості, або її еволюційна зміна у часі, одержується як сума для всіх молекул з урахуванням відповідних правил. Група (**C**) об'єднує методи, у яких специфічний молекулярний компонент рідини, тобто «розчинена речовина», розглядається на мікроскопічному рівні, тоді як усе інше, тобто «розчинник», описується з позицій постійного розподілу. Властивості, що цікавлять нас насамперед, одержують, використовуючи потенціали взаємодії «розчинена речовина – розчинник». Група (**D**) охоплює методи, які фокусують увагу на взаємодіях розчиненої речовини із найближчим оточенням у вигляді молекул розчинника. При цьому назва «супермолекула» підкреслює істинну версію того, що всі молекули розглядаються з позицій рівного відношення, а досліджувана хвильова функція належить усій сукупності молекул як цілого. В інших варіантах може вводитись розділення сукупних хвильових функцій, а зовнішні частини кластера – описуватися на більш низькому розрахунковому рівні теорії, навіть у класичних моделях.

Ступінь деталізації опису, що необхідний для належного вивчення цих систем, закономірно зростає у переході від групи (**A**) до (**D**). З іншого боку, опис рідин за допомогою супермолекулярного наближення є цілком непридатним, й лише методи групи (**B**) та (**A**) можуть дати достовірне описання рідкої системи як єдиного цілого. Варто відзначити, що методи, які належать до груп (**B**) та (**C**), нині знаходять найбільш широке практичне застосування у комп'ютерній хімії[2].

Серед усього розмаїття загальнотеоретичних підходів слід звернути особливу увагу на *континуум*-методи[3]. Порівняно нещодавно було знайдено цілу низку доказів, що підкріплюють твердження про їх загальну інформативність, звичайно, у випадку правильного застосування, із одночасною можливістю щодо надання достовірної та детальної інформації, корисної саме для хімічних цілей. Квантово-хімічні версії *континуум*-моделей можуть надавати правильний опис впливу розчинника на властивості розчиненої речовини, зокрема енергію сольватації, а іноді й містити інформацію, одержану навіть із супермолекулярного наближення,

[2] Odette A. R. Quantum mechanical methods in computational chemistry. *IDOSR-JCAS.* 2024. Vol. 9. № 1. P. 8–9. https://doi.org/10.59298/JCAS/2024/91.6109000.

[3] Cammi R., Mennucci B., Tomasi J. Computational Modelling of the Solvent Effects on Molecular Properties: An Overview of the Polarizable Continuum Model (PCM) Approach. *Computational Chemistry: Reviews of Current Trends.* 2003. P. 70. https://doi.org/10.1142/9789812564368_0001.

наприклад під час включення до складу «розчиненої речовини» так званої першої сольватної оболонки[4, 5].

Без сумніву, більш низька вартість обчислень, беручи до уваги комп'ютерні симуляції, робить можливим використання точного опису «розчиненої речовини», який є досить корисним, наприклад під час деталізації механізмів хімічних реакцій. Ці переваги значною мірою поповнюють недостатність детального опису розчинника. Його розподілення, що зазвичай застосовується у *континуум*-методах, має дуже просте формулювання та вирізняється рівномірністю розподілу. Проблема, що нині постає перед *континуум*-методами, переважно стосується введення у розрахункову модель більш довершених розподілень розчинника, отриманих із комп'ютерних симуляцій. З іншого боку, одержані нещодавно приклади показують, що ці методи можуть надавати більш ефективні молекулярні потенціали, які застосовуються у симуляційних визначеннях. Варто підкреслити, що майбутній прогрес у теоретичному та розрахунковому вивченні хімічних процесів у розчині буде неодмінно пов'язаний у тому числі й із застосуванням наближень, що належать однаковою мірою до різних груп, особливо (**B**) та (**C**). Останні версії *континуум*-методів також володіють надзвичайною гнучкістю, що необхідна для підвищення ефективності їх практичного застосування.

1. Розрахункові методи для опису рідин. Основи сольватаційних *континуум*-методів та складники енергії сольватації

Нещодавні успіхи у сольватаційних методах переважно базуються на квантово-хімічному формулюванні основного їх різновиду, розробленого ще у 90-х рр. XX ст. При цьому ключовою формулою залишається класичне рівняння Шредінгера (1.1), виражене з точки зору молекулярного Гамільтоніана H^0 «розчиненої речовини» M, доповненого оператором V_{int} ефективного потенціалу взаємодії «розчинена речовина – розчинник»:

$$(H^0 + V_{int})\left|\Psi' >= E'\right|\Psi' > \qquad (1.1)$$

де $|\Psi' >$ – це електронна хвильова функція «розчиненої речовини».

[4] Tokar A. V. The quantum-chemical investigation of N-cyclization reaction mechanism for epichlorohydrin aminolysis products. *Visn. Dnipropetr. Univ.: Khim.* 2014. Vol. 22. № 2. P. 28–29. https://doi.org/10.15421/081418.

[5] Токар А. В., Петрушина Г. О. Квантово-хімічне дослідження механізму гетероциклізації олігомерного продукту амінолізу епіхлоргідрину: епоксид чи діоксан? *J. Chem. Technol.* 2018. Vol. 26. № 2. P. 16–17. https://doi.org/10.15421/0817260202.

Походження цього Гамільтоніана[6] можна пояснити у такий спосіб. Гамільтоніан всієї системи загалом, тобто розчину, підлягає послідовному розподілу, що розбиває його з точки зору руху різних часток системи, подібно до розділення на електронні та ядерні рухи, які застосовуються у квантовому представленні окремої молекули, зокрема з позицій наближення Борна-Оппенгеймера. Аналіз формальних аспектів цієї послідовності розбиття та поділу надають феноменологічне тлумачення сольватаційного процесу, що відповідає формальному розбиттю Гамільтоніана. Удосконалення цього тлумачення помітно просунулося вперед уже наприкінці XX ст. та продемонструвало можливість його подальшого розвитку. При цьому енергетичні величини із цілком визначеним термодинамічним статусом можуть бути виражені з точки зору виділення окремих внесків[7]. Зокрема, вільну енергію сольватації Гіббса зазвичай визначають як:

$$\Delta G_{solv} = W(M \mid S) + RTln \frac{\left(q_{rot} q_{vib} q_{trans}\right)_g}{\left(q_{rot} q_{vib} q_{trans}\right)_s} \tag{1.2}$$

У такому разі застосовують розділення функцій «розчиненої речовини» у газовій фазі та розчині. При цьому варто зазначити, що розділення функцій окремих молекул розчинника спеціально не береться до уваги; $W(M \mid S)$ іноді ще називають загальною роботою «розчиненої речовини» *M* та «розчинника» *S.* Ця величина може бути додатково розкладена таким чином:

$$W(M \mid S) = \Delta G_{el} + \Delta G_{dis} + \Delta G_{rep} + \Delta G_{cav} \tag{1.3}$$

Електростатичний компонент вільної енергії сольватації, а саме ΔG_{el}, відноситься до загальної та оборотної роботи електростатичної поляризації *M* та *S,* тоді як доданки ΔG_{dis} та ΔG_{rep} є членами, що відносяться до ефектів дисперсії та відштовхування, й діють між *M* та *S;* складник ΔG_{cav} є оборотною роботою утворення відповідної порожнини у розчиннику, що має власний розмір та форму, і відповідає за перебування *M* у *S* без якого-небудь залишку у вигляді порожнього простору. Перші три члени, а саме ΔG_{el}, ΔG_{dis} та ΔG_{rep}, можуть бути виражені за допомогою наведеного вище рівняння Шредінгера (1.1)

[6] Castaldo D., Jahangiri S., Delgado A., Corni S. Quantum Simulation of Molecules in Solution. *J. Chem. Theory. Comput.* 2022. Vol. 18. № 12. P. 7457. https://doi.org/10.1021/acs.jctc.2c00974.

[7] Luque F.J., Curutchet C., Muñoz-Muriedas J., Bidon-Chanal A., Soteras I., Morreale A., Gelpí J.L., Orozco M. Continuum solvation models: Dissecting the free energy of solvation. *Phys. Chem. Chem. Phys.* 2003. Vol. 5. № 18. P. 3827. https://doi.org/10.1039/b306954k.

у зручному для цього формулюванні. Слід зауважити, що з точки зору цілої низки історичних причин та деяких практичних аспектів зазвичай вдаються до врахування лише електростатичного компонента, тоді як оцінку інших членів розкладу здійснюють за допомогою окремих розрахунків, хоча на сучасному рівні цілком можливим є й одночасне оцінювання усього компонента $W(M \mid S)$.

У електростатичному наближенні V_{int} зазвичай заміняють на оператор потенціалу реакції V_{el}:

$$(H^0 + V_{el})\left|\Psi\right> = E\left|\Psi\right> \tag{1.4}$$

Є різні методи для визначення V_{el}. У тому випадку, коли вдається розв'язати електронну проблему, електростатична вільна енергія G_{el}, а також її різниця ΔG_{el} визначаються як:

$$G_{el} = \left\langle \Psi \left| H^0 + 1/2 V_{el} \right| \Psi \right\rangle \tag{1.5}$$

$$\Delta G_{el} = G_{el} - \left\langle \Psi^0 \left| H^0 \right| \Psi^0 \right\rangle \tag{1.6}$$

Останні рівняння включають ядерно-ядерні та ядерно-реакційні потенціальні взаємодії; рівняння (1.4) загалом може бути розв'язане на різних рівнях теорії. Для цього застосовують як напівемпіричні, так і неемпіричні *ab initio* методи. При цьому більшість застосувань звичайно належить рівню теорії Хартрі-Фока, проте є й інші ефективні розрахункові алгоритми, що дозволяють застосування формалізмів мультиконфігураційного самоузгодженого поля (*MCSCF*) та конфігураційної взаємодії (*CI*), введення поправок так званої багатотільної або багаточасткової теорії збурень (*MBPT*) тощо[8]. Адже немає значних перешкод для того, щоб застосовувати рівняння (1.4) у межах будь-яких інших квантово-механічних розрахункових методів. Останньому рівнянню можна надати нової форми з точки зору теорії функціоналу густини (*DFT*). Воно також може бути використане як вихідна точка для формального підтвердження та практичного застосування класичних сольватаційних методів з їх усіма необхідними інструментами. При цьому одноелектронна загальна зарядова густина «розчиненої речовини» *M,* а саме $\rho = \rho^{el} + \rho^{nuc}$, може бути виражена у класичній термінології, зокрема через атомні

[8] Cramer C. J., Truhlar D. G. Continuum Solvation Models. In: Tapia, O., Bertrán, J. (eds). Solvent Effects and Chemical Reactivity. *Understanding Chemical Reactivity.* 2002. Vol. 17. P. 55. Springer, Dordrecht. https://doi.org/10.1007/0-306-46931-6_1.

заряди з можливістю використання інших термінів у сегментному розширенні ρ^{el}, таких як дипольні та квадрупольні компоненти та/або введення сегментації, що не зосереджена на ядрі, а також поляризаційних ефектів, які належать розчиннику та можуть бути описані за допомогою атомних поляризованостей. Енергія взаємодії у системі «розчинена речовина – розчинник», визначена відповідно як $\int \rho \cdot V_{el} dr$, може бути надалі розрахована із застосуванням виразів V_{el}, подібних до тих, що застосовуються у квантових формулюваннях або більш простих вираженнях, одержаних із формули Борна для енергії взаємодії сферичного заряду із діелектричним континуумом[9]. Напівкласичні сольватаційні методи відіграють важливу роль у розвитку сучасної комп'ютерної хімії, хоча деякі з розрахункових процедур, що призначені для розв'язку електростатичної проблеми, залишаються незручними у їх квантовому формулюванні, проте застосовуються тут із успіхом. Повернення до класичних сольватаційних методів, які є доволі корисними для вивчення деяких розчинених речовин, спонукає до пошуку контрольних показників цих розрахункових схем.

Вочевидь, що рівняння (1.4) відіграє центральну роль у розробці розрахункових сольватаційних методів, які можна охарактеризувати відповідно до вибраної методології як:

(1) спроби опису оператора V_{el};

(2) визначення особливостей порожнини;

(3) розв'язок цільового рівняння.

Підходами, що широко застосовуються для описання оператора V_{el}, є:

(1) мультипольне розширення (*MPE*);

(2) явний заряд поверхні (*ASC*);

(3) уявний заряд (*IMC*);

(4) метод кінцевих різниць (*FDM*);

(5) метод скінченних елементів (*FEM*).

Перші три підходи знаходять широке застосування під час проведення квантово-хімічних розрахунків, тоді як усі п'ять їх різновидів мають місце у виконанні класичних обчислень. Порожнини[10], що найчастіше застосовуються, мають:

(1) правильну форму (сферичну, еліпсоїдну, циліндричну);

(2) форму молекули, представлену у вигляді сукупності сфер.

---

[9] Herbert J. M. Dielectric continuum methods for quantum chemistry. *WIREs Comput. Mol. Sci.* 2021. Vol. 11. № 4. e1519–1. https://doi.org/10.1002/wcms.1519.

[10] Scalmani G., Barone V., Kudin K.N., Pomelli C.S., Scuseria G.E., Frisch M.J. Achieving linear-scaling computational cost for the polarizable continuum model of solvation. *Theor. Chem. Acc.* 2004. Vol. 111. P. 95. https://doi.org/10.1007/s00214-003-0527-2.

При цьому якість одержаних числових результатів є досить чутливою та залежить від вибору форми й об'єму порожнини. Поєднання мультипольного розширення (*MPE*) та порожнин з правильною формою робить розрахунки доволі ефективними. Звісно, що існують певні проблеми сходження, які можуть бути пом'якшені, наприклад шляхом звернення до сегментарних розширень або зміни опису V_{el}, особливо у тих випадках, коли форма молекули суттєво відрізняється від форми порожнини. Своєю чергою якість результатів (*ASC*) залежить від мозаїчності поверхні самої порожнини, а також від нормалізації поверхні заряду: при цьому її форма не має особливого значення, а найчастіше застосовуваними є відносно прості форми молекул. Підхід уявних зарядів (*IMC*) переважно обмежений сферичними порожнинами для молекул «розчиненої речовини»: вони широко застосовуються для окремих тонких шарів рідин, обмежених жорсткими стінками.

Беручи до уваги попереднє обговорення, принципового значення набуває можливість розв'язку наведеного вище рівняння Шредінгера (1.4). При цьому існує наступний вибір розрахункових схем, а саме: ітераційний розв'язок, прямий розв'язок, прямі методи реактивного поля, а також відсутність розв'язку цільового рівняння.

Варто зазначити, що ітераційний розв'язок застосовується найбільш широко. На кожному етапі (окремому кроці) V_{el}, що є функцією $|\Psi\rangle$, оптимізується до певного граничного значення. Для цього зазвичай досить виконати лише кілька кроків оптимізації. Прямий розв'язок застосовується у підходах явного заряду поверхні (*ASC*). У цьому випадку розв'язок рівняння (1.4) замінюється на мінімізацію функціоналу вільної енергії. Цей метод потребує значно більшої розрахункової роботи, ніж ітераційне наближення, й до недавнього часу застосовувався лише на напівемпіричному рівні. Сучасне *ab initio* формулювання визначається розширенням методу аналітичними розрахунками похідних енергії[11].

Обидва підходи звертаються до рішення нелінійної проблеми, коли V_{el} перебуває у залежності від $|\Psi\rangle$. Прямі методи реактивного поля вже зустрічаються із лінійною проблемою: джерелом реактивного поля тут є розподіли миттєвих елементарних зарядів, а не звичайний розподіл заряду. Це наближення підтримується моделлю, у якій основні квантові ідеї зводяться до класичного опису частини всієї матеріальної системи. Цей метод активно застосовується для розв'язку динамічних проблем,

[11] Tomasi J. Selected features of the polarizable continuum model for the representation of solvation. *WIREs Comput. Mol. Sci.* 2011. Vol. 1. № 5. P. 855. https://doi.org/10.1002/wcms.54.

оскільки його вважають окремим випадком зв'язування електронних рухів у «розчиненій речовині» та «розчиннику». Класичні методи зазвичай не потребують розв'язку рівняння (1.4). У деяких версіях модель може бути розширена з урахуванням «розчинених речовин» у сольових розчинах.

Методи, що нині активно застосовуються для оцінки складника ΔG_{dis}, засновані переважно на таких наближеннях, як:

(1) формалізм реактивного поля;

(2) використання атом-атомних дисперсійних потенціалів, що зводяться до *континуум*-розподілу розчинника;

(3) застосування атом-атомних дисперсійних потенціалів, які зводяться до дискретного пакування молекул розчинника;

(4) використання емпіричних формул для встановлення зв'язку доданку ΔG_{dis} та поверхні порожнини.

Формалізм реактивного поля у представлених версіях зазвичай обмежується диполярним компонентом, вираженим у наближенні Лондона. При цьому відповідний оператор V_{dis} може бути доданий до V_{el} у Гамільтоніані рівняння (1.1). Остання програма належить до ітераційної родини (*ASC*), де введення складника ΔG_{dis} має на меті створення вбудованого ітераційного циклу. Наближення із використанням атом-атомних дисперсійних потенціалів, що зводяться до *континуум*-розподілу розчинника, є доволі ефективним з розрахункової точки зору та з успіхом застосовується для неоднорідних розподілів молекул. Його головним недоліком є емпірична природа застосовуваних потенціалів. Це наближення також використовують для одержання величин ΔG_{rep}. Численні результати, отримані у разі застосування такого наближення, вказують на існування відповідності між поверхнею порожнини та величиною $\Delta G_{dis-rep}$: при цьому регресійний коефіцієнт становить більше, ніж 0,99 та слугує непрямим підтвердженням цих емпіричних формул. Вільну енергію кавітації ΔG_{cav} розраховують окремо за наявними для цього залежностями, що засновані на різних параметрах «розчиненої речовини»:

(1) поверхневому натягу з урахуванням мікроскопічних поправок;

(2) ізотермічній стисливості рідин;

(3) коефіцієнтах термічного розширення або інших геометричних параметрах.

Варто зазначити, що остання формула застосовується найбільш часто. Крім того, найближчим часом слід очікувати подальшого удосконалення розрахунку параметра ΔH_{cav}. Останній член рівняння (1.2) може бути розрахований із застосуванням стандартних процедур статистичної механіки, а також шляхом введення до чисельних результатів, одержаних

за допомогою *ab initio* методів, деяких емпіричних поправок, зокрема бар'єру обертання молекул у рідині, поправок на енергію нульових коливань, низькочастотних коливальних та торсійних рухів тощо. При цьому кінцеве значення енергії сольватації не критично залежить від оцінки усіх цих поправок.

Порівняння розрахункових та експериментальних значень величин ΔG_{solv}, мабуть, можна вибрати як найперший тест на перевірку валідності моделі. На сьогодні є достатня кількість даних, щоб зробити деякі важливі висновки:

(1) для нейтральних «розчинених речовин» континуум-моделі здатні надавати результати лише у діапазоні експериментальних похибок;

(2) при цьому необхідно оцінити всі складники – електростатичний, дисперсійно-відштовхувальний та кавітаційний; розрахунки, що відкидають деякі з цих членів, можуть застосовуватися лише для порівняння обмежених класів «розчинених речовин», наприклад, різних конформацій однієї й тієї ж молекули;

(3) точні розрахунки потребують застосування порожнин належної форми, більш прості з них допускаються лише за обмежених умов;

(4) внески коливальних та обертальних розділених функцій не мають вирішального значення для жорстких каркасних структур «розчинених речовин», хоча деякі поправки на рухи з великою амплітудою, а також присутність водневих зв'язків у розчині є доволі зручними;

(5) внески енергії, що належать локальним змінам у розподілі молекул розчинника, є обмеженими;

(6) напівемпіричні процедури також можуть застосовуватись, даючи адекватні результати, особливо у разі введення належного градуювання.

Континуум-методи добре зіставляються з іншими розрахунковими наближеннями. Порівняння вільної енергії збурення, що походить з молекулярної динаміки (MD-FEP), та *ab initio* розрахунків (PCM) за умов однакової вихідної геометрії молекул та набору базисних функцій, вказує на середню похибку визначення експериментальної величини на рівні не більше 1,5 ккал/моль (MD-FEP) та 0,8 ккал/моль (PCM). Що ж стосується розрахунків ΔG_{solv} для заряджених часток «розчинених речовин», й особливо катіонів з високою густиною поверхневого заряду, то їх варто визнати найменш точними, адже в цьому випадку пряме зіставлення результатів розрахунків з експериментальними величинами неможливе через брак останніх. Порівняно проста модель, що виходить із припущення про однорідність діелектричного середовища навколо заряджених часток «розчинених речовин», безумовно, потребує уточнення, оскільки ефекти так званого електричного насичення

у *континуум*-моделях можуть становити значний внесок у відповідні величини ΔG_{solv} для окремих йонів[12, 13].

Таким чином, наявні результати розрахунків вказують на те, що на майбутнє поправки для молекулярних йонів не будуть різко змінювати остаточних висновків, попередньо зроблених для нейтральних часток «розчинених речовин». Також варто зазначити, що у випадку кватернізованих за атомами Нітрогену органічних сполук одержати цілком адекватні дані можна лише у випадку застосування порожнин належної форми, а також встановлення всіх членів розкладу $W(M \mid S)$.

2. Розширення моделі з метою вивчення хімічних процесів у розчині. Інтерпретація внутрішнього механізму реакції

Незважаючи на прискіпливу увагу до опису базових аспектів квантової *континуум*-моделі, ще зовсім нещодавно не існувало стандартної версії цього методу, так само, як і його окремих елементів, що могли б допомогти потенційним користувачам зробити свій вибір серед кількох доступних різновидів[14]. З цієї точки зору оцінювання адекватності моделі лише за енергією сольватації, не вдаючись у подробиці щодо інших аспектів формулювання оцінки за цією величиною, все ще залишається актуальним завданням. При цьому варто зазначити, що встановлення ΔG_{solv} для невеликих за розміром молекул розчиненої речовини за умов необмеженого розбавляння розчинів є доволі невеликою частиною загальної тематики теоретичної хімії, що стосується саме цієї галузі. У наш час значну увагу приділяють також розробці та вдосконаленню основних розрахункових моделей, які все ще залишаються недосяжними у своїх базових версіях. Їх еволюція відбувається доволі швидко, пропонуючи додаткові обчислювальні алгоритми для опису:

(1) хімічної рівноваги у розчині;
(2) процесів молекулярної асоціації;
(3) механізмів хімічних реакцій;
(4) випаровування, розчинення та переносу рідкої фази;
(5) розпізнавання «активних» ділянок молекул;
(6) молекулярних коливань;

---

[12] Ateshian G. A., Nims R. J., Maas S., Weiss J. A. Computational modeling of chemical reactions and interstitial growth and remodeling involving charged solutes and solid-bound molecules. *Biomech. Model. Mechanobiol.* 2014. Vol. 13. № 5. P. 1105. https://doi.org/10.1007/s10237-014-0560-1.

[13] Bryantsev V.S., Diallo, M. S., Goddard, W. A. 3rd. Calculation of solvation free energies of charged solutes using mixed cluster/continuum models. *J. Phys. Chem. B.* 2008. Vol. 112. № 32. P. 9709. https://doi.org/10.1021/jp802665d.

[14] Curtin W. A., Miller R. Atomistic/continuum coupling in computational materials science. *Model. Simul. Mater. Sci.* 2003. Vol. 11. № 3. R33-1. https://doi.org/10.1088/0965-0393/11/3/201.

(7) електронних спектрів;
(8) фотохімічних перетворень;
(9) локальної неоднорідності, що виникає у системі;
(10) глобальної неоднорідності середовища;
(11) анізотропних властивостей рідин;
(12) впливу йонної сили розчину тощо.

Не маючи можливості розглянути всі зазначені аспекти, варто зосередити особливу увагу на вивченні механізмів хімічних реакцій[15], щоб продемонструвати, якого саме розширення потребує той чи інший розрахунковий метод у цьому випадку. Насамперед слід розглянути формальну структуру можливого підходу до вивчення механізмів хімічних перетворень з використанням *континуум*-моделі. При цьому основна процедура здебільшого дозволяє розрахувати вільну енергію G для «розчиненої речовини», яку не варто плутати з величиною ΔG_{solv}, за будь-якої ядерної геометрії молекули, а саме визначити гіперповерхню вільної енергії $G(R)$ як функцію ядерних координат «розчиненої речовини» $\{R\}$. Під останньою частіше за все розуміють взаємодіючі між собою молекули, що можуть бути доповнені, коли це дійсно необхідно, обмеженою кількістю молекул розчинника. Сформована поверхня $G(R)$ або набір цих поверхонь, що відповідає різним електронним станам «розчиненої речовини», зрештою відповідатиме деякій поверхні $E(R')$ у газовій фазі. У такому разі варто застосувати ту саму стратегію аналізу, що була сформульована від самого початку для системи у вакуумі.

Спершу встановлюють геометрію, енергію та електронну структуру реагентів, продуктів, інтермедіатів та перехідних станів[16, 17], а потім визначають реакційну координату та частину поверхні потенційної енергії вздовж неї, що безумовно є необхідною для вивчення динаміки реакційного перетворення. За такого підходу хімічна інтерпретація механізму загалом буде заснована на критичному розгляді хвильової функції «розчиненої речовини», що виконуватиметься за допомогою належних технічних прийомів, які є відмінними від тих, що активно застосовуються у газовій

[15] Harvey J., Himo F., Maseras F., Perrin L. Scope and Challenge of Computational Methods for Studying Mechanism and Reactivity in Homogeneous Catalysis. *ACS Catal.* 2019. Vol. 9. № 8. P. 6803. https://doi.org/10.1021/acscatal.9b01537.

[16] Токар А. В., Чигвінцева О. П. Квантово-хімічні аспекти структурування у механізмі термічного перегрупування Курціуса деяких арил- та гетарилацилазидів: вплив кислотно-каталітичних та сольватаційних ефектів середовища. *J. Chem. Technol.* 2026. Vol. 34. № 1. P. 40. https://doi.org/10.15421/jchemtech.v34i1.336743.

[17] Токар А. В., Чигвінцева О. П. Теоретичне вивчення механізму термічного перегрупування Курціуса деяких арил- та гетарилацилазидів із прогнозуванням перебігу подальшої циклотримеризації. *J. Chem. Technol.* 2024. Vol. 32. № 4. P. 897–900. https://doi.org/10.15421/jchemtech.v32i4.310213.

фазі, оскільки за таких умов до теоретичної моделі неодмінно буде включено інформацію, одержану безпосередньо із реактивного поля. Таку схему варто доповнити за рахунок включення деяких динамічних ефектів.

Добре відомо, що для багатьох важливих хімічних процесів реакційна динаміка не може бути належним чином описана, спираючись виключно на поверхні типу $G(R)$: таким випадком є модель переносу електрона[18], у якій динаміка передається лише координатою розчинника за умов фіксованої геометрії «розчиненої речовини», що спонукає до розширення базового визначення гіперповерхні вільної енергії за рахунок введення деяких додаткових координат $\{D\}$ та застосування більш загальної функції виду $G(R+D)$ у тих випадках, де це є дійсно необхідним. Варто зазначити, що подібне розширення простору зовсім не є еквівалентним включенню більшої кількості молекул розчинника до складу «розчиненої речовини».

Інші динамічні ефекти належать до нескінченних флуктуацій розчинника. Згадана вище модель переносу електрона насправді цілком заснована на таких неоднорідностях, які у загальному випадку можуть відігравати важливу роль під час перебігу багатьох хімічних процесів. Цей особливий момент зазвичай трактують за рахунок додавання нових вимірів до простору $\{R\}$ з координатами $\{F\}$, які є подібними, але не еквівалентними до відповідних координат $\{D\}$. Такий спрощений варіант доволі складної проблеми квантового вивчення систем, що складаються з великої кількості хімічно взаємодіючих між собою молекул, потребує деяких видозмін та обов'язкових доповнень до основної моделі.

Ефективна процедура визначення положень мінімумів та сідлових точок на поверхні $G(R)$ потребує застосування алгоритму, що надає аналітичні першу та другу похідні $G(R)$, позначені як $G^{\alpha}(R)$ та $G^{\alpha\beta}(R)$ відповідно, беручи до уваги координати окремих ядер у молекулі. Таке специфічне використання розширень *континуум*-моделі, мабуть, є найбільш цікавим. Похідні, що враховують ядерні координати, значно полегшують застосування тих методів, результати яких сильно залежать від розміру базисних наборів, зокрема у вивченні магнітних явищ. Поряд із іншими визначеннями параметрів α та β можна прийти до більш компактного алгоритму оцінювання молекулярних особливостей, що суттєво спрощує вивчення впливу тиску та температури на хімічні явища у розчині, а також полегшує розгляд сольватації у суперкритичних рідинах.

[18] Leal A., Kulik D., Smith W., Saar M. An overview of computational methods for chemical equilibrium and kinetic calculations for geochemical and reactive transport modeling. *Pure Appl. Chem.* 2017. Vol. 89. № 5. P. 609–610. https://doi.org/10.1515/pac-2016-1107.

Ефективні вирази для градієнта G_{el}, $G_{el}(R)$ одержано у формалізмі мультипольного розширення (*MPE*) для порожнин із простою еліптичною формою. У цьому випадку стає можливим відбір факторів реактивного поля, які мають аналітичний вираз, що залежить лише від діелектричної константи та фіксованої геометрії порожнини. Розширення цього підходу до порожнин з більш загальною формою нині є актуальним завданням. Порівняно нещодавно з'явилися розрахункові алгоритми для оцінки $G(R)$ та $G(R)$, що активно застосовуються як для визначення критичних точок на поверхні $G(R)$, так і для оцінювання гармонічних силових констант на різних рівнях квантової теорії, однак цей метод зазвичай обмежується лише сферичними порожнинами з дипольним силовим полем. Якщо ж робити вибір на користь підходу явного заряду поверхні (*ASC*) у формулюванні моделі поляризуючого континууму (*PCM*), то для одержання величин $G(R)$ та $G(R)$ варто відмовитись від ітераційної процедури, замінивши її на прямий метод, що потребує інверсії матриці. За такого формулювання окремі внески належатимуть частковим похідним поверхні та порожнини. Крім того, метод враховує похідні від $\Delta G_{dis-rep}$ та ΔG_{cav} відповідно. Варто зазначити, що існують й інші підходи, які дають аналітичні похідні всіх членів розкладу $W(M|S)$, наприклад у межах емпіричного формулювання[19].

У дослідженні реакційного механізму іноді нехтують частиною поверхні $G(R)$, розглядаючи зближення реагентів, які спочатку розділені молекулами розчинника, а згодом досягають більш тісного контакту. Цей складник механізму реакції, безумовно, є важливим та потребує детального розгляду. Насправді, наявне явище так званої часткової десольватації реагентів, яке може відкривати реакційний канал, що залишається неактивним у відповідної реакції в газовій фазі, або зробити більш широким та менш глибоким локальний мінімум, який належить передреакційному комплексу. Варто зазначити, що у багатьох версіях основної *континуум*-моделі цілком відсутня можливість розгляду одразу двох «розчинених речовин», розділених молекулами розчинника. Розповсюдження теоретичної моделі на такі випадки відбувається порівняно легко у розрахунку G_{el} у межах підходу явного заряду поверхні (*ASC*), однак у будь-якому разі обчислювальні алгоритми, що визначають форму порожнини та відповідають за розрахунок G_{cav}, повинні бути видозмінені.

[19] Alibakhshi A., Hartke B. Improved prediction of solvation free energies by machine-learning polarizable continuum solvation model. *Nat. Commun.* 2021. Vol. 12. № 3584-1. https://doi.org/10.1038/s41467-021-23724-6.

Це розширення *континуум*-формалізму є суттєвим для опису взаємозв'язку між сольватно-розділеними та контактними йонними парами. Добре відомо, що проста розрахункова модель не здатна до опису енергетичного профілю такої рівноваги, хоча цілком прийнятного описання все ж можна досягнути й для особливих випадків. Останнє розширення *континуум*-наближення з успіхом застосовується для визначення ефективних взаємодій пари «йон-вода», зокрема у симуляціях молекулярної динаміки. При цьому пара потенціалів включає неадитивні поляризаційні ефекти стосовно всіх порядків у розширенні теорії для великої кількості часток. Зміни у статичному та динамічному описі розчинника навколо катіонів переважно здійснюються за рахунок заміни традиційних потенціалів взаємодії двох часток цими новими потенціалами, які з такої точки зору є більш суттєвими. Зазначимо також, що експериментальні значення цих величин для першої та другої сольватної оболонки багатьох катіонів нині відтворюються із високою точністю.

Молекули розчинника іноді можуть виступати у ролі каталізаторів під час перебігу багатьох типів хімічних реакцій. У такому разі необхідне примусове введення до складу «розчиненої речовини» потрібної кількості молекул *S*. Однак при цьому залишається відкритим питання щодо проявів каталітичних ефектів самого розчинника у тому чи іншому хімічному перетворенні[20]. Виходом з такої ситуації може слугувати здійснення порівняльного аналізу різноманітних поверхонь $G(R)$, які різняться за кількістю молекул *S*, що введені до складу теоретичної моделі. Для реалізації такого підходу варто залучити розрахункові методи, що здатні поводитися зі структурами типу $M \cdot S_n$ або $M \cdot S_{n-1}$, в яких одна із молекул розчинника заміщена на квантову одиницю суцільного навколишнього середовища. У тому випадку, коли молекула *S* не відіграє якої-небудь помітної ролі під час перебігу процесу, енергія системи залишатиметься на сталому рівні, навіть за умов виникнення водневого зв'язку між частками. При цьому типова похибка становитиме не більше 10% від енергії взаємодії у газовій фазі та може бути доведена до меж експериментальної точності у разі введення спеціальної поправки на помилку суперпозиції базисного набору. Необхідність її застосування пов'язана зі зменшенням енергії взаємодії та являє собою розширення *континуум*-процедури, яке рекомендують до застосування у вивченні хімічної рівноваги асоціативних процесів у розчині.

У багатьох реакціях має місце так званий гетеролітичний розрив ковалентного зв'язку, що призводить до виникнення часток із

[20] Norjmaa G., Ujaque G., Lledós A. Beyond Continuum Solvent Models in Computational Homogeneous Catalysis. *Top. Catal.* 2022. Vol. 65. P. 132–135. https://doi.org/10.1007/s11244-021-01520-2

протилежними зарядами, які своєю чергою здатні до зустрічної взаємодії в умовах їх асоціації. При цьому основна процедура для розрахунку енергії сольватації має особливе значення у тих випадках, коли «розчинена речовина» містить центри із явним розподілом заряду. У разі розгляду ефектів розділення або компенсації зарядів зручним розширенням основної моделі слугує формулювання, в якому ε має функціональну залежність від електричного поля F, що діє у кожній точці розчинника (F). Це розширення потребуватиме важливих видозмін у тих формулюваннях основної моделі, які засновані на припущенні, що поза межами порожнини рівняння Лапласа $\nabla^2\Phi(r)=0$ виконується всюди. У випадку родини методів (*ASC*) останнє означає заміну методу граничних елементів (*BEM*) на метод скінченних елементів (*FEM*), або іншими словами, заміну явного заряду поверхні на розсіяні заряди (*ADC*). Розрахунковий *ab initio* метод, що вводить у програму (*PCM*) формулювання (*FEM*), було розроблено порівняно нещодавно. При цьому можливий розв'язок квантової проблеми як у прямий спосіб, так і у межах ітераційного наближення. Змінена процедура застосовується також і для нейтральних «розчинених речовин», зберігаючи риси первинної процедури (*PCM*), та дозволяє здійснити плавний перехід (*ASC*)→(*ADC*). Тут порожнина переважно визначається ділянкою простору, де $\varepsilon=1$ та є не більшою за поверхню, на якій розміщено поляризаційні заряди. Варто зазначити, що реалістичний вираз для функції (F) все ще залишається невизначеним: поєднання молекулярних симуляцій із інтегральними підходами, мабуть, є найкращою стратегією розв'язку цієї проблеми.

Ідентифікувати геометрію та енергію локальних мінімумів і сідлових точок не є цілком достатнім для повного опису статичного аспекту механізму реакції[21, 22]. Доволі часто виникає необхідність у розумінні того, чому поверхня реакційного перетворення має саме таку форму, яку показано за допомогою розрахунків. Методи, що розроблені для аналізу реакцій у газовій фазі, можуть застосовуватися з цією метою лише у тих випадках, коли вони суттєво доповнені новими елементами, які передають присутність середовища. Найбільш важливими з них є нові фактори, які фактично можна звести до реактивного потенціалу розчинника Φ_σ та реактивного поля $-\nabla\Phi_\sigma$. Ці величини легко вводяться у напівкласичну картину міжмолекулярних взаємодій, яка використовується вже доволі

[21] Tshilande N., Mammino L., Bilonda M. K. The Study of Molecules and Processes in Solution: An Overview of Questions, Approaches and Applications. *Computation.* 2024. Vol. 12. № 4. P. 78. https://doi.org/10.3390/computation12040078.

[22] Lipparini F., Mennucci B. Perspective: Polarizable continuum models for quantum-mechanical descriptions. *J. Chem. Phys.* 2016. Vol. 144. № 160901-3. https://doi.org/10.1063/1.4947236.

давно. При цьому Φ_σ та $-\nabla\Phi_\sigma$ можуть бути розкладені на локальні внески, що відносяться у наближеннях (*ASC*) до особливих ділянок поверхні порожнини або особливих молекулярних субодиниць[23, 24], які доповнено у цьому випадку за рахунок сукупних внесків.

Застосування такого підходу стосовно багатьох типів хімічних процесів дозволяє вивчати каталітичні ефекти розчинника, зокрема й води, де завдяки здійсненню сегментації локалізованих орбіталей та розподілу зарядів у «розчиненій речовині» вдається продемонструвати, які саме процеси часткового розриву або утворення зв'язків чи переносу протона відбуваються у певних частинах субстрату завдяки впливу розчинника, а також показати, яким чином окрема молекула води може виконувати функцію каталізатора. Звичайно, існують й інші методи теоретичного аналізу, в яких різниця енергій орбіталей та елементи матриці орбітальних взаємодій, як правило, сильно залежать від впливу розчинника. При цьому відкриваються широкі можливості щодо розробки нових розрахункових процедур та їх подальшого обґрунтування.

Як уже зазначалося раніше, поверхню $G(R)$ можна активно застосовувати для вивчення не лише статичних, але й динамічних аспектів реакційного механізму, наприклад використовуючи процедуру класичної траєкторії. В багатьох випадках цього опису виявляється не досить, у зв'язку із чим виникає нагальна потреба досліджувати процеси, які перебігають у розчині, беручи до уваги фактор часу[25]. Молекулярна динаміка з цієї точки зору є найбільш підходящим методом, що активно застосовується для розгляду проблеми молекулярних рухів, проте такий підхід не досить повно описує електронні ефекти. Останні можуть бути розглянуті більш детально у *континуум*-методах, тому для вивчення динаміки хімічних процесів варто поєднувати розрахункові можливості обох теоретичних наближень. Для одержання фізичних моделей динаміки реакції частіше за все використовують діелектричний підхід, за якого вводиться початкове розділення електричного поляризаційного вектора на швидку та повільну компоненту: $p = p_{fast} + p_{slow}$. При цьому швидкий компонент належить до електронної поляризації, а повільний – до обертальних та поступальних компонентів відповідно. Введення динамічних координат розчинника $\{D\}$,

[23] Nottoli M., Herbst M., Mikhalev A., Jha A., Lipparini F., Stamm B. ddX: Polarizable continuum solvation from small molecules to proteins. *WIREs Comput. Mol. Sci.* 2024. Vol. 14. № 4. P. 14. https://doi.org/10.1002/wcms.1726.

[24] Mennucci B. Continuum Solvation Models: What Else Can We Learn from Them? *J. Phys. Chem. Lett*. 2010. Vol. 1. № 10. P. 1666. https://doi.org/10.1021/jz100506s.

[25] Токар А. В., Чигвінцева О. П. ЯМР Спектральні параметри систем на основі ароматичних поліамідів: квантово-хімічна інтерпретація сольватаційних ефектів середовища. *J. Chem. Technol.* 2022. Vol. 30. № 3. P. 351–353. https://doi.org/10.15421/jchemtech.v30i3.262860.

як уже зазначалося раніше, відкриває нові теоретичні можливості щодо зміни класичного формулювання цієї моделі на форму, цілком придатну для проведення квантово-хімічних розрахунків.

У підходах (*ASC*) з'являється можливість для розділення явних зарядів у такий самий спосіб: $\sigma = \sigma_{fast} + \sigma_{slow}$. При цьому повільну компоненту можна використати як динамічну координату розчинника, тоді як поверхнею порожнини слід скористатися як координатою іншого типу. Варто зазначити, що динамічні координати доволі часто мають відношення лише до невеликої частини розчинника, яка безпосередньо оточує «розчинену речовину»: у такому разі лише частина σ_{slow} або відповідної поверхні порожнини може бути використана з цією метою. Іноді застосовують й інші варіанти поділу σ, особливо у тих випадках, коли динамічний процес можна описати лінійною комбінацією двох електронних конфігурацій, як наведено нижче:

$$\Psi(t) = c_1(t) \cdot \Psi_1 + c_2(t) \cdot \Psi_2 \qquad (2.1)$$

де Ψ_1 та Ψ_2 можуть бути, наприклад, парою, що складається з ковалентної структури та відповідного аналога із явним розподілом заряду. За такого підходу обидва набори зарядових поверхонь σ_1 та σ_2, згенерованих за допомогою $|\Psi_1|^2$ та $|\Psi_2|^2$, можуть бути використані як координати $\{D\}$. Подібне визначення останніх можна одержати також із застосуванням *континуум*-методів, що не засновані на явних зарядах. Вираз для повільної компоненти поляризаційного вектора p_{slow} з точки зору внесків діабатичного стану використовують у багатьох випадках, так само, як і швидкий складник p_{fast}. За умов основного визначення повного набору координат $\{S\}$ динамічні координати розчинника для заданої геометрії «розчиненої речовини» визначають за поляризаційним вектором, одержаним для належної геометрії.

ВИСНОВКИ

Вивчення динаміки хімічних процесів за допомогою *континуум*-наближення загалом залишається відкритим для важливих методологічних нововведень та теоретичних надбудов і на сучасному етапі є перспективним напрямом для проведення досліджень, що постійно набувають нових форм та зазнають бурхливого розвитку. Дійсно, наведені результати квантово-хімічних розрахунків переконливо свідчать про можливість застосування *континуум*-методів у найрізноманітніших галузях комп'ютерної хімії – від вивчення особливостей перебігу найпростіших модельних перетворень у розчині до розгляду складних систем на основі біополімерів, мембран,

матриць, нанокомпозитів тощо. Особливої уваги заслуговує також теоретичне обґрунтування внутрішніх механізмів гомогенного каталізу, аналіз особливостей стану хімічної рівноваги у розчині, зокрема дисоціативних та асоціативних процесів, які перебігають за участю заряджених часток, таутомерних перетворень складних гетероциклічних систем. При цьому першочергового значення набуває необхідність розробки відповідного програмного забезпечення як на основі вже запропонованих, так і нових чисельних методів з більш високою точністю виконання математичних розрахунків, що з цієї точки зору виступатиме надійною рушійною силою на шляху розвитку сучасного комп'ютерного моделювання хімічних систем у *континуум*-середовищі.

АНОТАЦІЯ

Запропоновано огляд квантово-хімічних розрахункових методів, що активно застосовують *континуум*-наближення для опису хімічних проблем у розчині. Детально розглянуто різноманітні розрахункові стратегії, що пропонуються для основної моделі, яка являє собою окремо взяту «розчинену речовину» у постійному *континуум*-середовищі. За умов оцінювання вільної енергії сольватації виділено та досліджено її електростатичний компонент, а також інші (неелектростатичні) складники, що враховують ефекти дисперсії, відштовхування та кавітації. Також обговорено розширення основної моделі для вивчення хімічних реакцій. При цьому особливу увагу приділено аналізу каталітичних ефектів розчинника, вивченню процесів, які перебігають із розділенням зарядів та формуванням локальної анізотропії, а також трактуванню реакційного механізму з точки зору динаміки хімічного перетворення. У кожному з цих випадків молекулам розчинника відведено роль активного реагенту, який не просто супроводжує взаємодіючі частки вздовж вибраної внутрішньої координати реакції, але й виступає як сольватаційний партнер, забезпечуючи додатковий стабілізуючий вплив на систему загалом. Одержані результати можуть бути покладені в основу подальшого розвитку *континуум*-методів з точки зору їх більш глибокого теоретичного обґрунтування та розширення перспективних галузей практичного застосування.

Література

1. Felice R., Mayes M., Richard R., Williams-Young D., Chan G., de Jong W., Govind N., Head-Gordon M., Hermes M., Kowalski K., Li X., Lischka H., Mueller K., Mutlu E., Niklasson A., Pederson M., Peng B., Shepard R., Valeev E., Zimmerman P. A Perspective on Sustainable Computational Chemistry Software

Development and Integration. *J. Chem. Theory Comput.* 2023. Vol. 19. № 20. P. 7056–7076. https://doi.org/10.1021/acs.jctc.3c00419.

2. Odette A. R. Quantum mechanical methods in computational chemistry. *IDOSR-JCAS.* 2024. Vol. 9. № 1. P. 6–10. https://doi.org/10.59298/JCAS/2024/91.6109000.

3. Cammi R., Mennucci B., Tomasi J. Computational Modelling of the Solvent Effects on Molecular Properties: An Overview of the Polarizable Continuum Model (PCM) Approach. *Computational Chemistry: Reviews of Current Trends.* 2003. P. 1–79. https://doi.org/10.1142/9789812564368_0001.

4. Tokar A. V. The quantum-chemical investigation of N-cyclization reaction mechanism for epichlorohydrin aminolysis products. *Visn. Dnipropetr. Univ.: Khim.* 2014. Vol. 22. № 2. P. 27–30. https://doi.org/10.15421/081418.

5. Токар А. В., Петрушина Г. О. Квантово-хімічне дослідження механізму гетероциклізації олігомерного продукту амінолізу епіхлоргідрину: епоксид чи діоксан? *J. Chem. Technol.* 2018. Vol. 26. № 2. P. 12–19. https://doi.org/10.15421/0817260202.

6. Castaldo D., Jahangiri S., Delgado A., Corni S. Quantum Simulation of Molecules in Solution. *J. Chem. Theory. Comput.* 2022. Vol. 18. № 12. P. 7457–7469. https://doi.org/10.1021/acs.jctc.2c00974.

7. Luque F. J., Curutchet C., Muñoz-Muriedas J., Bidon-Chanal A., Soteras I., Morreale A., Gelpí J. L., Orozco M. Continuum solvation models: Dissecting the free energy of solvation. *Phys. Chem. Chem. Phys.* 2003. Vol. 5. № 18. P. 3827–3836. https://doi.org/10.1039/b306954k.

8. Cramer C. J., Truhlar D. G. Continuum Solvation Models. In: Tapia, O., Bertrán, J. (eds). Solvent Effects and Chemical Reactivity. *Understanding Chemical Reactivity.* 2002. Vol. 17. P. 1–80. Springer, Dordrecht. https://doi.org/10.1007/0-306-46931-6_1.

9. Herbert J. M. Dielectric continuum methods for quantum chemistry. *WIREs Comput. Mol. Sci.* 2021. Vol. 11. № 4. e1519. https://doi.org/10.1002/wcms.1519.

10. Scalmani G., Barone V., Kudin K. N., Pomelli C. S., Scuseria G. E., Frisch M. J. Achieving linear-scaling computational cost for the polarizable continuum model of solvation. *Theor. Chem. Acc.* 2004. Vol. 111. P. 90–100. https://doi.org/10.1007/s00214-003-0527-2.

11. Tomasi J. Selected features of the polarizable continuum model for the representation of solvation. *WIREs Comput. Mol. Sci.* 2011. Vol. 1. № 5. P. 855–867. https://doi.org/10.1002/wcms.54.

12. Ateshian G. A., Nims R. J., Maas S., Weiss J. A. Computational modeling of chemical reactions and interstitial growth and remodeling involving charged

solutes and solid-bound molecules. *Biomech. Model. Mechanobiol.* 2014. Vol. 13. № 5. P. 1105–1120. https://doi.org/10.1007/s10237-014-0560-1.

13. Bryantsev V. S., Diallo M. S., Goddard W. A. 3rd. Calculation of solvation free energies of charged solutes using mixed cluster/continuum models. *J. Phys. Chem. B.* 2008. Vol. 112. № 32. P. 9709–9719. https://doi.org/10.1021/jp802665d.

14. Curtin W. A., Miller R. Atomistic/continuum coupling in computational materials science. *Model. Simul. Mater. Sci.* 2003. Vol. 11. № 3. R33. https://doi.org/10.1088/0965-0393/11/3/201.

15. Harvey J., Himo F., Maseras F., Perrin L. Scope and Challenge of Computational Methods for Studying Mechanism and Reactivity in Homogeneous Catalysis. *ACS Catal.* 2019. Vol. 9. № 8. P. 6803–6813. https://doi.org/10.1021/acscatal.9b01537.

16. Токар А. В., Чигвінцева О. П. Квантово-хімічні аспекти структурування у механізмі термічного перегрупування Курціуса деяких арил- та гетарилацилазидів: вплив кислотно-каталітичних та сольватаційних ефектів середовища. *J. Chem. Technol.* 2026. Vol. 34. № 1. P. 35–41. https://doi.org/10.15421/jchemtech.v34i1.336743.

17. Токар А. В., Чигвінцева О. П. Теоретичне вивчення механізму термічного перегрупування Курціуса деяких арил- та гетарилацилазидів із прогнозуванням перебігу подальшої циклотримеризації. *J. Chem. Technol.* 2024. Vol. 32. № 4. P. 895–902. https://doi.org/10.15421/jchemtech.v32i4.310213.

18. Leal A., Kulik D., Smith W., Saar M. An overview of computational methods for chemical equilibrium and kinetic calculations for geochemical and reactive transport modeling. *Pure Appl. Chem.* 2017. Vol. 89. № 5. P. 597–643. https://doi.org/10.1515/pac-2016-1107.

19. Alibakhshi A., Hartke B. Improved prediction of solvation free energies by machine-learning polarizable continuum solvation model. *Nat. Commun.* 2021. Vol. 12. № 3584. https://doi.org/10.1038/s41467-021-23724-6.

20. Norjmaa G., Ujaque G., Lledós A. Beyond Continuum Solvent Models in Computational Homogeneous Catalysis. *Top. Catal.* 2022. Vol. 65. P. 118–140. https://doi.org/10.1007/s11244-021-01520-2.

21. Tshilande N., Mammino L., Bilonda M. K. The Study of Molecules and Processes in Solution: An Overview of Questions, Approaches and Applications. *Computation.* 2024. Vol. 12. № 4. P. 78. https://doi.org/10.3390/computation12040078.

22. Lipparini F., Mennucci B. Perspective: Polarizable continuum models for quantum-mechanical descriptions. *J. Chem. Phys*. 2016. Vol. 144. № 160901. https://doi.org/10.1063/1.4947236.

23. Nottoli M., Herbst M., Mikhalev A., Jha A., Lipparini F., Stamm B. ddX: Polarizable continuum solvation from small molecules to proteins. *WIREs Comput. Mol. Sci.* 2024. Vol. 14. № 4. P. 1–24. https://doi.org/10.1002/wcms.1726.

24. Mennucci B. Continuum Solvation Models: What Else Can We Learn from Them? *J. Phys. Chem. Lett.* 2010. Vol. 1. № 10. P. 1666–1674. https://doi.org/10.1021/jz100506s.

25. Токар А. В., Чигвінцева О. П. ЯМР Спектральні параметри систем на основі ароматичних поліамідів: квантово-хімічна інтерпретація сольватаційних ефектів середовища. *J. Chem. Technol.* 2022. Vol. 30. № 3. P. 349–354. https://doi.org/10.15421/jchemtech.v30i3.262860.

Information about the author:
Tokar Andriy,
Candidate of Chemical Sciences,
Associate Professor at the Department of Chemistry
Dnipro State Agrarian and Economic University
25, Serhiya Yefremova Street, Dnipro, Ukraine

CHAPTER 27

ENVIRONMENTALLY BENIGN STRATEGIES FOR THE SYNTHESIS AND FUNCTIONALIZATION OF IMIDAZOLIDINE-BASED SYSTEMS

Kharchenko Yuliia
DOI https://doi.org/10.30525/978-9934-26-714-7-27

INTRODUCTION

The field of heterocyclic chemistry has undergone a profound transformation over the last two decades, driven by the escalating necessity to align synthetic methodologies with the principles of green chemistry. Imidazolidine-based systems, specifically heterocyclic ketene aminals (HKAs), also identified as cyclic 1,1-enediamines, represent a class of scaffolds with immense structural diversity and significant biological relevance[1]. These systems are characterized by a unique electronic architecture wherein the two nitrogen atoms of the imidazolidine ring facilitate a strong "push-pull" effect, donating electron density into an exocyclic double bond that is typically activated by electron-withdrawing groups such as nitro, carbonyl, or cyano moieties[2]. This specific electronic arrangement renders them highly versatile as building blocks for the construction of complex fused heterocycles, including imidazopyridines, imidazoquinolines, and various polycyclic architectures[3, 4, 5].

[1] Wang S.-Y., Zhang Z.-W., Yuan L., Jin Y., Zhang C.-H., Lin J. Efficient Synthesis of Bicyclic 2-Pyridinones and 6-Amino-2-pyridinones by the Regioselective Cycloaddition of Nitro Ketene Aminal with 3-Hydroxy-2-aryl-acrylate. *European Journal of Organic Chemistry*. 2022. No. 26. DOI: 10.1002/ejoc.202201268.

[2] Kong L., Yan S., Lin J. Heterocyclic Ketene Aminals: Leading Molecules to Construct Molecular Diversity Fused Heterocyclic Compounds. *Progress in Chemistry*. 2018. Vol. 30, No. 5. P. 639–657. DOI: 10.7536/PC171208.

[3] Vala M., Bayat M., Bayat Y. One-pot Synthesis of Dihydro-8H-acenaphtho[1′,2′:4,5]pyrrolo[1,2-a] imidazole-diol Derivatives. *Molecular Diversity*. 2021. Vol. 25. DOI: 10.1007/s11030-020-10078-2.

[4] Hooshmand E., Ziyaei A. Nitroalkenes in diverse synthesis of heterocyclic compounds with two or three heteroatoms: recent advances. *Targets in Heterocyclic Systems*. 2019. Vol. 22. DOI: 10.17374/targets.2019.22.119.

[5] Li M., Zhou Z.-M., Wen L.-R., Qiu Z.-X. Chemistry of heterocyclic ketene aminals: construction of imidazo(pyrido)[1,2-a]pyridines and imidazo(pyrido)[3,2,1-ij][1,8]naphthyridines via DABCO-catalyzed tandem annulations. *The Journal of Organic Chemistry*. 2011. Vol. 76, № 9. P. 3054–3063. DOI: 10.1021/jo102167g.

As the global chemical community moves toward carbon neutrality and minimized environmental impact, the traditional reliance on hazardous organic solvents, toxic transition-metal catalysts, and energy-intensive heating protocols has become increasingly untenable[6, 7]. Consequently, researchers have pioneered a wide array of environmentally benign strategies for the synthesis and functionalization of these systems. These strategies encompass the use of aqueous media, solvent-free mechanochemistry, organocatalysis, and alternative energy sources such as microwave and ultrasound irradiation. Furthermore, the implementation of multicomponent reactions (MCRs) has emerged as a cornerstone of sustainable synthesis, offering high atom economy and reducing the number of purification steps required to achieve structural complexity[8, 9, 10].

While recent years have witnessed increasing attention to sustainability, the mechanistic underpinnings of these transformations remain the central factor governing efficiency, regioselectivity, and scalability. The present study therefore evaluates environmentally benign strategies not merely as solvent substitutions but as modifications that interact directly with the intrinsic electronic and conformational properties of the HKA scaffold.

1. Sustainable Synthetic Strategies for Imidazolidine-Based Systems

The evolution of sustainable chemistry in the context of imidazolidine and HKA synthesis is best categorized through the specific green strategies employed to reduce environmental footprints. The following mapping details the most representative publications in this field, categorized by their primary green innovation.

1.1. Resource-Efficient Synthetic Approaches

Resource efficiency represents one of the central pillars of sustainable chemistry. For imidazolidine-based systems and heterocyclic ketene aminals

[6] Kumari M., Haribabu N. Green multicomponent reactions for the synthesis of biologically relevant heterocycles: a sustainable approach. *International Journal of Novel Research and Development*. 2025. Vol. 10. DOI: 10.56975/ijnrd.v10i7.308394.

[7] Mohlala R. L., Rashamuse T., Coyanis E. Highlighting multicomponent reactions as an efficient and facile alternative route in the chemical synthesis of organic-based molecules: a tremendous growth in the past 5 years. *Frontiers in Chemistry.* 2024. Vol. 12. DOI: 10.3389/fchem.2024.1469677.

[8] Kasana S., Kurmi B., Patel P. Green synthesis of pyridine and their fused system: harnessing the catalytic power of ionic liquids for sustainable and efficient multicomponent reaction. *Current Organic Chemistry*. 2024. Vol. 29. DOI: 10.2174/0113852728331797240903101654.

[9] Salis C., Mohammedi S., Turazza L., Blandin Y., Garnier M., Hemmert C., Baltas M., Gornitzka H. Mechanochemistry to form substituted imidazoles, imidazolium salts and NHC–gold complexes with fluorine-containing groups. *Molecules.* 2025. Vol. 30, № 3. Article 522. DOI: 10.3390/molecules30030522.

[10] Yu X.-L., Fan Y.-H., Zheng X.-N., Gao J.-F., Zhuang L.-G., Yu Y.-L., Xi J.-H., Zhang D.-W. Synthesis of imidazole-based molecules under ultrasonic irradiation approaches. *Molecules*. 2023. Vol. 28, № 12. Article 4845. DOI: 10.3390/molecules28124845.

(HKAs), this goal is achieved through solvent-free synthesis, mechanochemical activation, multicomponent reactions, and one-pot methodologies. These approaches reduce material consumption, minimize waste generation, and improve atom utilization while maintaining high levels of synthetic performance.

Solvent-Free and Mechanochemical Synthesis

The removal of the solvent phase is perhaps the most direct route to minimizing the E-factor (Environmental Factor) in chemical synthesis, as solvents frequently represent the majority of the mass in a reaction mixture.

In mechanochemical synthesis, the high energy imparted by collisions in a ball mill overcomes the activation energy barriers that would normally require high-temperature reflux. The absence of a solvent means that the reactants are at maximum concentration, which often alters the product selectivity. A prime example is the selective formation of E-regioisomers in the mechanochemical preparation of nitrofurantoin, where the steric constraints of the solid state favor the thermodynamic product more effectively than solution-phase synthesis.

Mechanochemical activation has emerged as an alternative mode of energy input for HKA functionalization. Saha et al. demonstrated[11], that high regioselectivity was achieved under milling conditions without liquid media. The absence of solvent increases effective reactant concentration and may alter transition-state organization compared to solution-phase analogues. This methodology utilizes a mixer-mill to facilitate the regioselective functionalization of imidazo-fused systems on a silica gel matrix. The green aspect is the total absence of liquid solvents during the reaction and the use of inexpensive, readily available precursors to generate the active thiocyanating agent *in situ*. The key advantage is the achievement of high yields at ambient temperature within short reaction times – 30 minutes.

Similarly, in paper[12] the researchers report a highly efficient ball-milling strategy for the quaternization of imidazoles, producing imidazolium salts and NHC-gold complexes. The green benefit lies in the 79–99% yields obtained without solvent use and the circumvention of traditionally long reflux times. This approach is particularly transformative for the synthesis of precursors for gold-based catalysts. Although not limited exclusively to HKAs, these examples illustrate broader mechanochemical principles applicable to imidazolidine-based systems.

---

[11] Saha S., Pinheiro A. B., Chatterjee A., Bhutia Z. T., Banerjee M. A Solvent-Free Mechanochemical Electrophilic C–H Thiocyanation of Indoles and Imidazo[1,2-a]pyridines Using a Cost-Effective Combination of N-Chlorosuccinimide–NaSCN. *Green Chemistry.* 2024. DOI: 10.1039/D4GC00486H.

[12] Salis C., Mohammedi S., Turazza L., Blandin Y., Garnier M., Hemmert C., Baltas M., Gornitzka H. Mechanochemistry to form substituted imidazoles, imidazolium salts and NHC–gold complexes with fluorine-containing groups. *Molecules*. 2025. Vol. 30, № 3. Article 522. DOI: 10.3390/molecules30030522.

Yaqub et al. describe[13] a solvent-free approach for the construction of fused heterocyclic architectures from ketene aminals. The green aspect centers on the reduction of organic waste and the simple purification procedures. The advantage is the broad functional group tolerance and the generation of derivatives with significant pharmacological potential.

The study of direct phosphorylation of heteroarenes under oxygen, metal-free, and solvent-free conditions[14] details the oxidative functionalization of nitrogen heterocycles using atmospheric oxygen as the terminal oxidant. The green aspect is the combination of being metal-free and solvent-free, using air as a benign reagent. The key advantage is the direct access to phosphorylated imidazolidine-related heterocycles with high atom economy.

A four-component reaction for the synthesis of 1,2,4,5-tetrasubstituted imidazoles (Fig. 1) is performed[15] under solvent-free conditions using a novel ionic liquid catalyst. It is worth noting that the authors compared the reaction under different conditions – methanol, ethanol, DMF and DMSO, a solvent-free system. The best yields in the shortest time were shown by the solvent-free approach. The advantage is the short reaction time and excellent yields (average 86%).

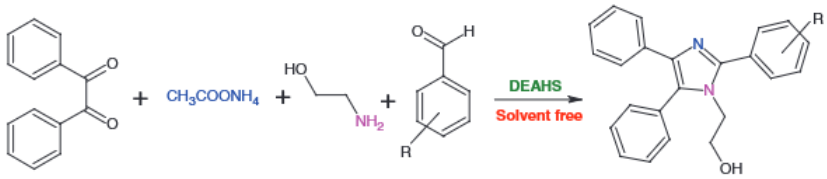


Fig. 1. Synthesis of 1,2,4,5-tetrasubstituted imidazoles

However, mechanochemical protocols introduce variables distinct from solution chemistry. Solid-state diffusion, particle size distribution, and mechanical energy transfer become critical determinants of reproducibility. The selective formation of E-configured products (Fig. 2) in mechanochemical drug

[13] Yaqub M., Batool J., Mahmood K., Ashraf A., Perveen R., Shafiq Z. Regioselective Synthesis of Fused Ring Heterocyclic Derivatives of Ketene Aminals and Their Biological Activities. *Journal of Heterocyclic Chemistry*. 2020. DOI: 10.1002/jhet.4014.

[14] Luo K., Chen Y. Z., Chen L. X., Wu L. Autoxidative C(sp^2)–P Formation: Direct Phosphorylation of Heteroarenes under Oxygen, Metal-Free, and Solvent-Free Conditions. *The Journal of Organic Chemistry*. 2016. Vol. 81, No. 11. P. 4682–4689. DOI: 10.1021/acs.joc.6b00592.

[15] Mohamed S., Simpson J., Marzouk A., Talybov A., Abdelhamid A., Abdullayev Y., Abbasov V. Multicomponent Green Synthesis, Spectroscopic and Structural Investigation of Multi-Substituted Imidazoles. Part 1. *Zeitschrift für Naturforschung B*. 2015. Vol. 70. DOI: 10.1515/znb-2015-0067.

synthesis, as reported in the cited study[16], may indicate that crystal-packing constraints contribute to the observed stereochemical outcome. This paper highlights the ball-milling of amino-hydantoins and aldehydes to produce commercial drug molecules. The green aspect is the solvent-, base-, and waste-free stoichiometric processing. The key advantage is the selective formation of the more stable E-regioisomers in pure form without post-reaction workup.

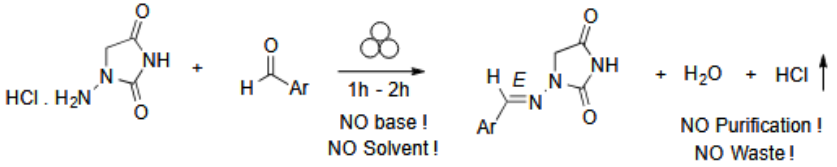


Fig. 2. The selective formation of E-configured products

A solvent-free protocol for the site-selective synthesis of functionalized indoles from HKAs is shown in paper[17]. The green aspect is the efficient use of mechanical or thermal energy in the absence of liquid media. The advantage is the construction of complex indole frameworks with high regioselectivity (Fig. 3).



Fig. 3. The synthesis of functionalized indoles from HKAs

Thus, while solvent-free methods reduce solvent mass, their synthetic efficiency must be interpreted in light of solid-state reactivity constraints and scalability considerations.

The management of thiol byproducts generated during the cyclization step deserves particular attention from a green chemistry perspective. The authors

[16] Colacino E., Porcheddu A., Halasz I., Charnay C., Delogu F., Guerra R., Fullenwarth J. Mechanochemistry for "No Solvent, No Base" Preparation of Hydantoin-Based Active Pharmaceutical Ingredients: Nitrofurantoin and Dantrolene. *Green Chemistry.* 2018. Vol. 20, No. 13. P. 2973–2977. DOI: 10.1039/C8GC01345D.

[17] Luo D. Y., Hu X. M., Huang R., Cui S. S., Yan S. J. Base-Promoted Relay Reaction of Heterocyclic Ketene Aminals with o-Difluorobenzene Derivatives for the Highly Site-Selective Synthesis of Functionalized Indoles. *Tetrahedron.* 2021. DOI: 10.1016/j.tet.2021.132275.

of the article[18] discus two mitigation strategies: chemisorption of the off-gas stream through a 10–15% sodium hydroxide solution, forming reversible alkali metal thiolates (controllable by adjusting alkali concentration or temperature to suppress hydrolysis), and oxidative scrubbing through saturated potassium iodate solution, which converts thiols to the considerably less toxic sulfenic, sulfinic, and sulfonic acids. Both approaches represent practical, low-cost solutions for hazard reduction at the laboratory scale and may serve as starting points for integrated gas-treatment protocols at larger scale.

Green Solvent Systems

Water, ethanol, and deep eutectic solvents (DES) provide sustainable alternatives to traditional dipolar aprotic solvents, often enhancing reaction rates through the "on-water" effect or unique hydrogen-bonding networks.

This foundational work[19] demonstrates the synthesis of imidazolidine-based HKAs from ketene dithioacetals and diamines in water (Fig. 4). The green aspect is the "on-water" acceleration and the total avoidance of acids or bases. The key advantage is the high regioselectivity and yields (90–96%) obtained at room temperature.

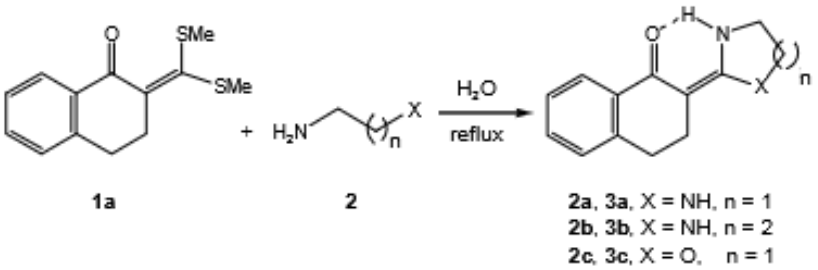


Fig. 4. The synthesis of imidazolidine-based HKAs

The mechanisms of these green syntheses frequently involve a sequence of Knoevenagel condensation, Michael addition, and intramolecular cyclization. In aqueous systems, the hydrophobic effect plays a major role in driving these components together. For instance, in the synthesis of oxa-aza[3.3.3]propellanes (Fig. 6), the insolubility of the ninhydrin-malononitrile adduct in water forces it into proximity with the nitroketene aminal, accelerating the Michael addition step.

[18] Фіголь М. П., Харченко Ю. В. Особливості синтезу кетенаміналей. *Природничі науки*. 2019. № 16. С. 86–89.

[19] Chanu L. G., Singh O. M., Jang S. H., Lee S. G. Regioselective Synthesis of Heterocyclic Ketene N,N-, N,O- and N,S-Acetals in Aqueous Medium. *Bulletin of the Korean Chemical Society*. 2010. Vol. 31, No. 4. P. 859–862. DOI: 10.5012/bkcs.2010.31.04.859.

Wen al.[20] report efficient annulation sequences in aqueous media, consistent with preorganization effects and hydrophobic aggregation. This work presents a detailed investigation of the synthesis of fused imidazo-heterocycles using water as the reaction medium. The green aspect is the circumvention of organic solvents and the achievement of high yields at ambient temperature. The advantage is the environmental safety and the broad scope of the aqueous S_NAr reaction.

Water likely influences HKA reactivity via multiple mechanisms:

– hydrogen-bond-assisted polarization of the exocyclic double bond;

– enhanced proximity of hydrophobic reactants (“on-water” effect);

– stabilization of zwitterionic intermediates.

For comparison, an analogous cyclization of ketene aminals[21] (Fig. 5) carried out in an acetonitrile environment required heating for 1 hour, whereas the analogous annulation carried out in water, as reported above, proceeds considerably faster – in just 10 minutes – illustrating the kinetic advantage of the aqueous medium for this reaction class.

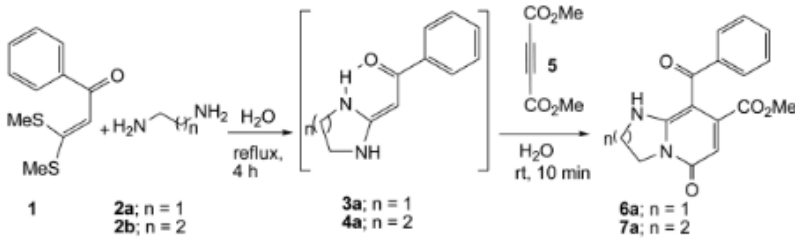


Fig 5. One-pot Synthesis of imidazo[1,2-a]pyridines and pyrido[1,2-a]pyrimidines

Beyond the bicyclic pyridine and pyrimidine scaffolds discussed above, the same aqueous “on-water” principles extend naturally to more complex, multi-ring architectures assembled in a single operation.

These features are especially evident in multicomponent cascade processes, such as the aqueous one-pot synthesis (Fig. 6) reported by Rahimi et al.[22], which

[20] Wen L. R., Li M., Wang L. J. Synthesis of Imidazo[1,2-a]pyridines and Pyrido[1,2-a]pyrimidines in Water and Their SNAr Cyclizations. *Bulletin of the Korean Chemical Society*. 2014. Vol. 35, No. 4. P. 995–1000. DOI: 10.5012/bkcs.2014.35.4.995.

[21] Orlov V. D., Kharchenko Yu. V., Gella I. M., Omel’chenko I. V., Shishkin O. V. Reactions of Ketene Aminals with N-Arylmaleimides and Dimethyl Acetylenedicarboxylate, a Direct Pathway to Derivatives of Pyrrolo[1,2-a]imidazole and Imidazo[1,2-a]pyridine. *Chemistry of Heterocyclic Compounds*. 2012. Vol. 48, No. 8. P. 1204–1212.

[22] Rahimi Z., Bayat M., Hosseini H. A Highly Chemo- and Regioselective Synthesis of Heterocyclic [3.3.3]Propellanes via Sequential Multicomponent Reactions in Water. *Scientific Reports*. 2025. Vol. 15, 27969. DOI: 10.1038/s41598-025-13577-0.

employs ninhydrin, malononitrile, and nitroketene aminals. The green aspect is the use of water as the sole solvent without the need for external catalysts. The advantage is the formation of multiple rings and bonds in one step with high atom economy and easy product separation, the saving of time and cost through sequential one-pot methods.

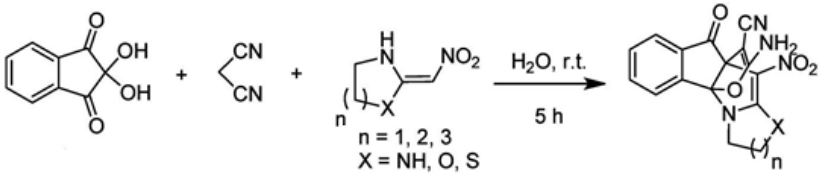


Fig. 6. The synthesis of oxa-aza[3.3.3]propellane derivativess

Notably, aqueous systems often enable direct isolation by precipitation, eliminating chromatographic purification and thereby improving overall process efficiency.

A one-pot three-component reaction performed in ethanol under catalyst-free conditions is discussed by Saeedi et al.[23]. The green aspect is the use of an environmentally benign solvent and the absence of toxic additives. As evidenced by the optimization data presented in Table 1, water proved to be an ineffective medium for this transformation, likely due to the limited solubility of the starting materials. However, the highest efficiency was achieved using ethanol as a sustainable solvent under catalyst-free conditions. Specifically, the reaction in refluxing ethanol (see Table 1, Entry 5) afforded the target product in an 88% yield, and eliminates the need for additional acidic or basic additives, which aligns with the principles of green chemistry. The advantage is the high yield and simple workup involving only filtration and washing.

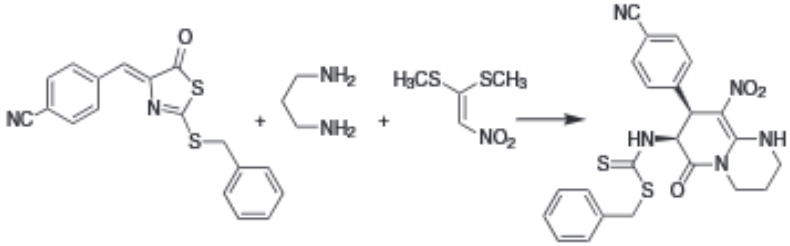


Fig. 7. The one-pot three-component reaction

[23] Saeedi M., Khoshdoun M., Mohammadi A., Halvagar M., Amani V. Synthesis of Functionalized Bicyclic Pyridones Containing Dithiocarbamate Group Using Thioazlactones, Diamines and Nitroketene Dithioacetal. *SynOpen*. 2021. DOI: 10.1055/a-1492-9229.

Table 1

The reaction conditions for the synthesis of bicyclic pyridines

Entry	Catalyst (mol%)	Solvent	Temp (°C)	Yield (%)[b]
1	–	EtOH	r.t.	NR
2	–	$CHCl_3$	r.t.	NR
3	–	H_2O	r.t.	NR
4	–	H_2O	reflux	NR
5	–	EtOH	reflux	88
6	PTSA (30)	EtOH	reflux	64
7	Et_3N (30)	EtOH	reflux	45

Further details on the ethanol-mediated synthesis of bicyclic pyridones are provided in article[24]. The green aspect is the high purity of the products which requires no chromatography. The advantage is the high efficiency and diastereoselectivity of the domino amidation.

This review and earlier research summary[25, 26], together highlight the use of Choline Chloride/Urea (DES) for the synthesis of imidazonaphthyridines. The environmental efficiency of this protocol is underscored by the dual role of the Deep Eutectic Solvent (DES), which functions simultaneously as a biodegradable medium and a Lewis acid catalyst. In this capacity, the DES facilitates the reaction by activating both the carbonyl and cyano groups through a robust hydrogen-bonding network (Fig. 8), thereby enhancing the electrophilicity of the reactants without the need for additional volatile organic solvents.

While solvent selection plays a central role in reducing the environmental footprint of HKA synthesis, the sustainability of a process is also strongly influenced by the nature of the catalyst employed. The development of recyclable, non-toxic, and highly efficient catalytic systems therefore represents a complementary strategy for improving both environmental and economic performance.

[24] Wang S.-Y., Zhang Z.-W., Yuan L., Jin Y., Zhang C.-H., Lin J. Efficient Synthesis of Bicyclic 2-Pyridinones and 6-Amino-2-pyridinones by the Regioselective Cycloaddition of Nitro Ketene Aminal with 3-Hydroxy-2-aryl-acrylate. *European Journal of Organic Chemistry*. 2022. No. 26. DOI: 10.1002/ejoc.202201268.

[25] Hooshmand E., Ziyaei A. Nitroalkenes in Diverse Synthesis of Heterocyclic Compounds with Two or Three Heteroatoms: Recent Advances. *Targets in Heterocyclic Systems*. 2019. Vol. 22. DOI: 10.17374/targets.2019.22.119.

[26] Shaabani A., Hooshmand S. E.; Tabatabaei A. T. Synthesis of fully substituted naphthyridines: A novel domino four-com-ponent reaction in a deep eutectic solvent system based oncholine chloride/urea. *Tetrahedron Lett*. 2015, 57, 351–353.

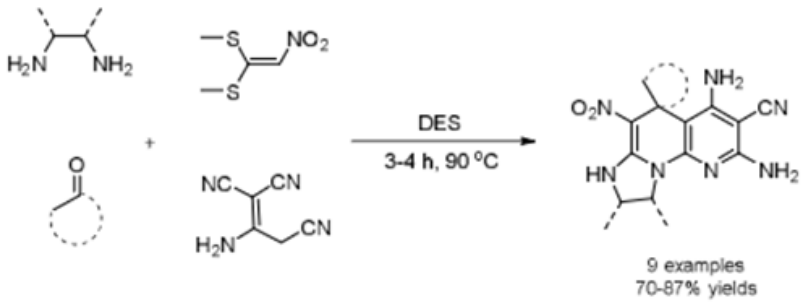


Fig. 8. Using DES in synthesis

1.2. Green Catalytic Strategies

Sustainable catalysis involves the use of recyclable heterogeneous catalysts or small organic molecules that mimic the efficacy of metals without the associated toxicity.

Mohamed et al.[27] investigated the catalytic power of a simple ionic liquid in the multicomponent synthesis of imidazole. An environmental aspect is the possibility of multiple use of the catalyst – for at least four cycles and the elimination of chromatographic purification. This approach allows for a reduction in the cost of the final product and the avoidance of the use of aggressive Lewis acids.

The study[28] utilizes a biodegradable amino acid as an organocatalyst. The green aspect is the use of a non-toxic, bio-based catalyst in a one-pot assembly. The advantage is the high structural diversity achieved with a simple experimental setup.

In the study by Albalawi et al.[29], microwave activation was compared with conventional heating methods for the synthesis of functionalized imidazolium-based ionic liquids. The green aspect is the use of ionic liquids as environmentally friendly solvents and catalysts. The advantage is the increased purity and yield obtained in just minutes.

---

[27] Mohamed S., Simpson J., Marzouk A., Talybov A., Abdelhamid A., Abdullayev Y., Abbasov V. Multicomponent Green Synthesis, Spectroscopic and Structural Investigation of Multi-Substituted Imidazoles. Part 1. *Zeitschrift für Naturforschung B*. 2015. Vol. 70. DOI: 10.1515/znb-2015-0067.

[28] Fu L., Lin W., Hu M.-H., Liu X.-C., Huang Z.-B., Shi D.-Q. Efficient Synthesis of Functionalized Benzo[b][1,8]naphthyridine Derivatives via Three-Component Reaction Catalyzed by L-Proline. *ACS Combinatorial Science*. 2014. Vol. 16, No. 5. P. 238–243. DOI: 10.1021/co4001524.

[29] Albalawi A., El-Sayed W., Aljuhani A., Almutairi S., Rezki N., Aouad M., Messali M. Microwave-Assisted Synthesis of Some Potential Bioactive Imidazolium-Based Room-Temperature Ionic Liquids. *Molecules*. 2018. Vol. 23. Article 1727. DOI: 10.3390/molecules23071727.

The methodology described by Phadtare et al.[30] introduces HBOB as an efficient, low-cost green catalyst. The green aspect is the high catalytic efficiency (70–95% yields) under mild conditions. The advantage is the accessibility of perimidine-based scaffolds which are related to the imidazolidine architecture.

The study by Zendehdel et al.[31] explores the use of HPA supported on NaY zeolites. The green aspect is the high dispersion and recyclability of the solid acid catalyst. The advantage is the easy separation of the catalyst from the reaction mixture and high acidic strength.

Collectively, the reviewed catalytic methodologies demonstrate that environmentally benign catalysts can successfully replace more hazardous conventional systems without compromising reaction efficiency. The combination of catalyst recyclability, operational simplicity, and high product yields highlights the important role of green catalysis in the sustainable synthesis of imidazolidine-based systems.

1.3. Energy-Efficient Technologies for Green Synthesis

Microwave irradiation, ultrasound-assisted synthesis, and continuous-flow technologies represent some of the most advanced tools of modern green chemistry. These approaches improve energy efficiency, reduce reaction times, and frequently enhance selectivity while minimizing solvent and resource consumption. As a result, they have become increasingly important for the sustainable synthesis and functionalization of imidazolidine-based systems and related heterocycles.

In the study by Albalawi et al.[32], a microwave-assisted approach was employed for the synthesis of imidazolidine-derived salts. The results demonstrated that microwave irradiation afforded satisfactory yields while substantially reducing reaction times compared with conventional heating methods.

The work of Sangi et al.[33] details the use of microwave energy to synthesize 2-(nitromethylene)imidazolidine derivatives (Fig. 9). The green aspect lies in the combination of rapid microwave-assisted synthesis with streamlined biological evaluation, reducing overall experimental time and resource consumption.

---

[30] Phadtare S. B., Vijayraghavan R., Shankarling G. S., MacFarlane D. R. Efficient Synthesis of 2,3-Dihydro-1H-Perimidine Derivatives Using HBOB as a Novel Solid Acid Catalyst. *Australian Journal of Chemistry*. 2012. Vol. 65. P. 86–90. DOI: 10.1071/CH11381.

[31] Zendehdel M., Mobinikhaledi A., Alikhani H., Jafari N. Preparation of Heteropoly Acid/Porous Hybrid Materials and Investigation of Their Catalytic Behavior in the Synthesis of Perimidine. *Journal of the Chinese Chemical Society.* 2010. Vol. 57. P. 683–689. DOI: 10.1002/jccs.201000095.

[32] Albalawi A., El-Sayed W., Aljuhani A., Almutairi S., Rezki N., Aouad M., Messali M. Microwave-Assisted Synthesis of Some Potential Bioactive Imidazolium-Based Room-Temperature Ionic Liquids. *Molecules.* 2018. Vol. 23. Article 1727. DOI: 10.3390/molecules23071727.

[33] Sangi D., Monteiro J., Vanzolini K., Cass Q., Paixão M., Correa A. Microwave-Assisted Synthesis of N-Heterocycles and Their Evaluation Using an Acetylcholinesterase Immobilized Capillary Reactor. *Journal of the Brazilian Chemical Society.* 2014. DOI: 10.5935/0103-5053.20140056.

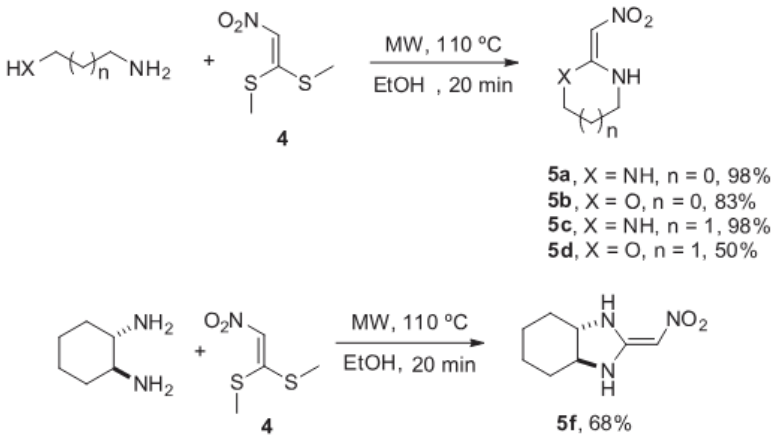


Fig. 9. The synthesis of 2-(nitromethylene)imidazolidine derivatives

A notable example is provided by Savych et al.[34], they use alternative energy to drive the condensation and annulation of chromones with HKAs (Fig. 10). The green aspect is the one-pot multicomponent strategy that saves energy and solvent. The advantage is the efficient generation of structurally complex phosphatase inhibitors through a single synthetic operation.

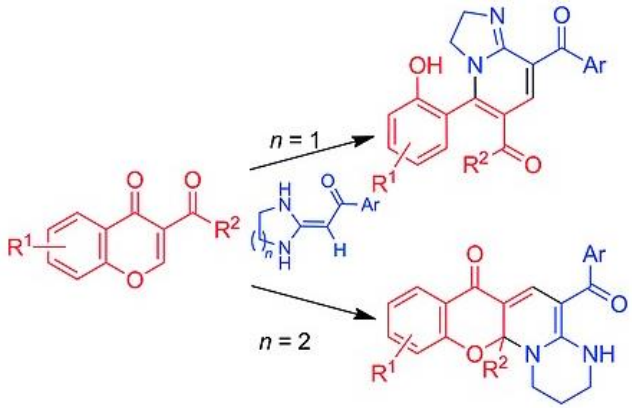


Fig. 10. The condensation and annulation of chromones with HKAs

[34] Savych I., Ejaz S. A., Shah S. J. A., Iaroshenko V. O., Villinger A., Sosnovskikh V. Y., Iqbal J., Abbasi A., Langer P. Reactions of 3-Acylchromones with Heterocyclic Ketene Aminals: One-Pot Synthesis and Phosphatase Inhibitory Activity of Fused Pyridine Derivatives. *European Journal of Organic Chemistry*. 2017. P. 186–202. DOI: 10.1002/ejoc.201601138.

Ran et al.[35] leverages microwave heating for the rapid synthesis of fluorophores from HKAs. The green aspect is the solvent-free conditions combined with efficient energy transfer. The advantage is the production of highly pure fluorophores suitable for imaging applications with minimal environmental footprint.

While conventional imidazole derivatives synthesis is limited by poor efficiency, ultrasound-assisted protocols offer a robust solution aligned with green chemistry principles. Recent developments[36, 37] demonstrate that ultrasonic irradiation enhances classical named reactions, delivering superior yields, improved selectivity, and reduced environmental footprints. The beneficial effects of sonochemical activation are generally attributed to acoustic cavitation, which generates localized high-energy microenvironments capable of promoting efficient bond formation under relatively mild bulk conditions. Consequently, ultrasound-assisted synthesis represents a valuable and sustainable strategy for the preparation of heterocyclic compounds.

1.4. Trend Analysis

The shift toward sustainable methodologies is most clearly visible when examining the quantitative metrics of atom economy, E-factor, and reaction efficiency.

The longitudinal analysis of the literature reveals several significant trends. Firstly, there is a clear trajectory from "green-solvent-assisted" methods toward "solvent-free" mechanochemical methods. In the early 2010s, the primary focus was on replacing hazardous chlorinated solvents with water or ethanol. By 2020, increasing attention was directed toward mechanochemical and solvent-free methodologies, which emerged as one of the most promising approaches for reducing solvent consumption and minimizing process waste.

Secondly, the complexity of the "one-pot" reactions has increased. While early methods focused on 3-component reactions, recent protocols often involve 4- or even 5-component cascades, enabling the formation of multiple covalent bonds in a single operation. This reduces the cumulative environmental impact associated with intermediate isolation and purification.

---

[35] Ran X., Zhou Q., Zhang J., Wang S., Wang G., Yang H., Liu X., Wang Z., Yu X. A Solvent-Free and Efficient Synthesis of Bicyclic 2-Pyridone Derivatives for Endoplasmic Reticulum Imaging. *Organic Chemistry Frontiers*. 2021. Vol. 8. DOI: 10.1039/D1QO00350J.

[36] Yu X.-L., Fan Y.-H., Zheng X.-N., Gao J.-F., Zhuang L.-G., Yu Y.-L., Xi J.-H., Zhang D.-W. Synthesis of Imidazole-Based Molecules under Ultrasonic Irradiation Approaches. *Molecules*. 2023. Vol. 28, No. 12. Article 4845. DOI: 10.3390/molecules28124845.

[37] Messali M., Aouad M. R., El-Sayed W. S., Al-Sheikh Ali A., Ben Hadda T., Hammouti B. New Eco-Friendly 1-Alkyl-3-(4-phenoxybutyl) Imidazolium-Based Ionic Liquids Derivatives: A Green Ultrasound-Assisted Synthesis, Characterization, Antibacterial Activity and POM Analyses. *Molecules*. 2014. Vol. 19, No. 8. P. 11741–11759. DOI: 10.3390/molecules190811741.

Thirdly, there is an increasing emphasis on catalyst life-cycle. The use of heterogeneous, recyclable catalysts and biodegradable organocatalysts like *L*-proline has become an increasingly important consideration in contemporary green chemistry research. Finally, the adoption of alternative energy (microwave and ultrasound) has evolved from a novelty to a practical tool for achieving high purity and speed, particularly in the synthesis of pharmaceuticals and imaging agents.

A significant finding of this review is that "green" claims in many publications lack quantitative support[38]. While yields are reported with high precision, metrics such as Process Mass Intensity (PMI) or Reaction Mass Efficiency (RME) are rarely calculated. For example, many studies describe their work as "efficient" and "green" while using large excesses of reagents (e.g., 2-5 equivalents) or large volumes of solvent for washing.

Without quantitative data, it is impossible to distinguish between a "green-labeled" process and a truly sustainable one. Sheldon's E-factor[39] remains among the most widely accepted metrics for evaluating waste generation, including solvents and catalysts. The available literature suggests that mechanochemical and multicomponent protocols frequently provide the most favorable balance between atom economy, waste reduction, and operational simplicity. However, meaningful comparison between different methodologies remains difficult because sustainability metrics are reported inconsistently across studies. Broader adoption of standardized parameters such as E-factor, PMI, and RME would greatly improve the objective assessment of green synthetic methodologies.

Although the reviewed methodologies share the common objective of reducng the environmental impact of chemical synthesis, they achieve this goal through different mechanisms, including solvent replacement, waste minimization, catalyst recyclability, and energy-efficient activation. Consequently, each strategy possesses characteristic strengths and limitations that influence its applicability in both laboratory and industrial settings. The main advantages and challenges associated with the principal green approaches employed in the synthesis of imidazolidine-based systems are summarized in Table 2.

Overall, the comparative analysis confirms that sustainable synthesis is best achieved through the integration of multiple green chemistry principles rather than reliance on a single strategy. Future developments are likely to focus on combining resource-efficient reaction design, environmentally benign media, recyclable catalysts, and energy-efficient technologies within unified synthetic platforms.

---

[38] Constable D., Curzons A., Cunningham V. Metrics to "Green" Chemistry – Which Are the Best? *Green Chemistry*. 2002. Vol. 4. P. 521–527. DOI: 10.1039/B206169B.

[39] Sheldon R. The E Factor at 30: A Passion for Pollution Prevention. *Green Chemistry*. 2023. Vol. 25. P. 1704–1728. DOI: 10.1039/D2GC04747K.

Table 2

Comparative Assessment of the Main Green Strategies Employed in the Synthesis of Imidazolidine-Based Systems

Green strategy	Main advantages	Main limitations
Water	Non-toxic, inexpensive, readily available	Limited solubility of many substrates
DES	Solvent and catalyst in one medium	High viscosity, difficult product separation
Mechanochemistry	Minimal solvent consumption, low E-factor	Scale-up and reproducibility challenges
Microwave	Rapid heating, short reaction times	Specialized equipment required
Ultrasound	Mild conditions, enhanced mass transfer	Limited scalability for industrial applications

2. Structure–Reactivity Relationships and Green Functionalization

The success of sustainable methodologies in HKA chemistry is fundamentally linked to the distinctive electronic structure of these compounds. Functionalization strategies that utilize the inherent reactivity of the imidazolidine ring allow for the construction of highly complex molecules without unnecessary derivatization steps.

The imidazolidine ring, particularly in its 2-alkylidene form (the HKA), possesses a unique electronic profile that enables its high reactivity in green media. The two nitrogen atoms exert a cooperative electron-donating mesomeric effect, donating electron density to the α-carbon of the exocyclic double bond. This creates a highly nucleophilic center, which is further activated by the presence of electron-withdrawing groups (NO_2, CN, COR) on the β-carbon.

This "push-pull" system is stabilized by internal hydrogen bonding, typically between the NH group of the imidazolidine ring and the electronegative atoms of the substituent on the exocyclic double bond. This hydrogen bonding plays a critical role in the regioselectivity of multicomponent reactions. In water, these hydrogen-bonding patterns are influenced by the surrounding solvent molecules, which can either stabilize the transition state through the "on-water" effect or provide an acidic/basic environment that catalyzes the ring-closing steps.

The publication[40] describes a sophisticated cascade where HKAs react with aldehydes and active methylene compounds. The green aspect is the formation

[40] Li M., Shao P., Wang S.-W., Kong W., Wen L.-R. Four-Component Cascade Heteroannulation of Heterocyclic Ketene Aminals: Synthesis of Functionalized Tetrahydroimidazo[1,2-a]pyridine Derivatives. *The Journal of Organic Chemistry*. 2012. Vol. 77, No. 20. P. 8956–8967. DOI: 10.1021/jo3013836.

of multiple C-C and C-N bonds in a single operation. The advantage is the high atom economy and the elimination of intermediate purification.

Yu et al.[41] focus on the construction of tetracyclic architectures from readily available precursors (Fig. 11). The green aspect is the one-pot multicomponent nature of the reaction. The advantage is the creation of complex biologically active frameworks with high efficiency.

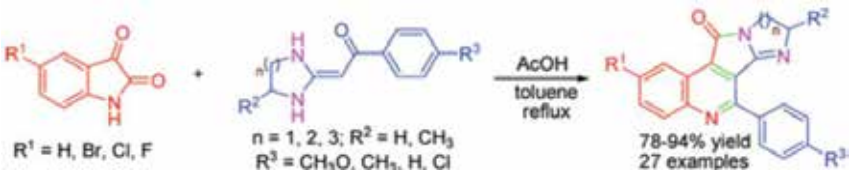


Fig. 11. The synthesis of substituted imidazopyrroloquinoline derivatives

Wen et al.[42] demonstrate how the electronic properties of the HKA can be tuned for regioselective synthesis (Fig. 12). The green aspect is the high step economy of the MCR. The advantage is the rapid access to naphthyridine frameworks which are rare in traditional synthesis.



Fig. 12. The synthesis of tetrahydrobenzo[*b*]imidazo[3,2,1-*ij*][1,8] naphthyridine derivatives

[41] Yu F., Yan S., Hu L., Wang Y., Lin J. Cascade Reaction of Isatins with Heterocyclic Ketene Aminals: Synthesis of Imidazopyrroloquinoline Derivatives. *Organic Letters*. 2011. Vol. 13, No. 18. P. 4782–4785. DOI: 10.1021/ol201783d.

[42] Wen L. R., Liu C., Li M., Wang L. J. Modulating the Reactivity of Heterocyclic Ketene Aminals in MCR: Selective Construction of Tetrahydrobenzo[b]imidazo[3,2,1-ij]naphthyridines. *The Journal of Organic Chemistry*. 2010. Vol. 75, No. 22. P. 7605–7614. DOI: 10.1021/jo101454q.

Collectively, these studies demonstrate that the intrinsic nucleophilicity of HKAs enables efficient multicomponent and cascade transformations, allowing the rapid construction of polycyclic frameworks with high atom economy and minimal intermediate handling.

Chen et al.[43] utilize ethanol as a green solvent for the assembly of imidazopyridinium salts (Fig. 13). The green aspect is the high atom economy (94%) and the use of sustainable reaction media. The advantage is the direct synthesis of functionalized materials for materials science and medicine.

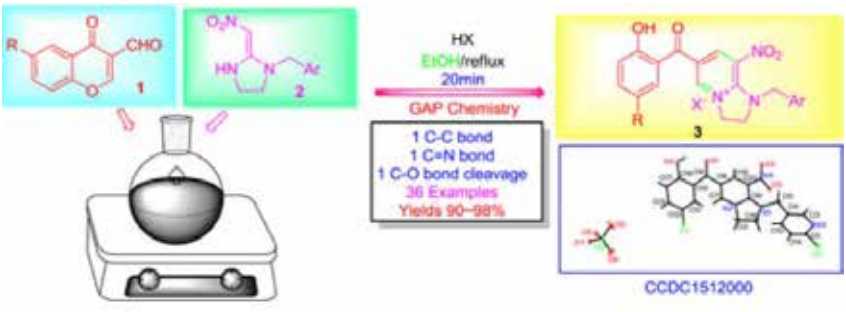


Fig. 13. The synthesis of functionalized bicyclic pyridinium derivatives

The versatility of HKAs is further illustrated by site-selective relay reactions with difluorobenzenes reported by Luo et al.[44], already discussed above in the context of solvent-free synthesis, can also be read from the perspective of functionalization strategy: it constitutes a relay reaction between HKAs and difluorobenzenes whose green aspect is the base-promoted site-selectivity that avoids transition metals. The advantage is the environmental safety and high yield of the indole products.

Functionalization strategies have shifted toward C-H activation and metal-free relay reactions. The use of $CaCl_2$ as a promoter in the reaction of HKAs with fluorinated benzaldehydes provides an excellent example of green functionalization principles in practice. By sequestering the byproduct hydrofluoric acid as solid CaF_2, the protocol mitigates the hazards associated with fluorine chemistry while maintaining high atom economy. This strategy

[43] Chen L., Huang R., Du X. X., Yan S. J., Lin J. One-Pot Synthesis of Highly Functionalized Bicyclic Imidazopyridinium Derivatives in Ethanol. *ACS Sustainable Chemistry & Engineering*. 2017. Vol. 5, No. 2. P. 1899–1905. DOI: 10.1021/acssuschemeng.6b02622.

[44] Luo D. Y., Hu X. M., Huang R., Cui S. S., Yan S. J. Base-Promoted Relay Reaction of Heterocyclic Ketene Aminals with o-Difluorobenzene Derivatives for the Highly Site-Selective Synthesis of Functionalized Indoles. *Tetrahedron*. 2021. DOI: 10.1016/j.tet.2021.132275.

illustrates how reagent design can simultaneously improve reaction selectivity, operational safety, and waste management.

Beyond substrate-controlled reactivity, catalyst selection also plays an important role in sustainable functionalization strategies. Furthermore, the integration of organocatalysis, such as *L*-proline-mediated synthesis, allows for the formtion of complex bicyclic systems under mild conditions. These organocatalysts are often biodegradable and non-toxic, addressing the sustainability issues associated with transition metals like Palladium or Rhodium that require expensive ligands and careful removal from final pharmaceutical products.

Overall, the unique electronic structure of HKAs provides an exceptional platform for sustainable functionalization. Their intrinsic nucleophilicity, ability to participate in multicomponent cascades, and compatibility with environmentally benign catalysts and reaction media enable the efficient synthesis of structurally diverse heterocyclic frameworks while minimizing waste generation and process complexity. These features explain why HKAs continue to attract considerable attention as versatile building blocks in green heterocyclic chemistry.

3. Applications and Industrial Feasibility

The practical utility of imidazolidine-based systems is widespread, spanning agriculture, medicine, and materials science.

Agrochemical and Toxicological Context

Imidazolidine is a structural component of neonicotinoids like imidacloprid, which revolutionized pest management but also raised significant environmental concerns regarding their impact on pollinators. Although the environmental concerns associated with certain neonicotinoids arise primarily from their biological activity rather than their synthesis, the development of greener synthetic routes can reduce the overall environmental footprint associated with their production. Beyond agrochemical applications, imidazolidine derivatives have also attracted interest in medicinal chemistry. For example, the discovery of 2-(nitromethylene)imidazolidine as a lead compound for Alzheimer's treatment highlights the versatility of the imidazolidine scaffold and its applicability across distinct areas of bioactive compound development. The development of green methodologies for these compounds contributes to minimizing the environmental footprint of their production.

Materials and Corrosion Inhibition

In materials science, functionalized imidazolium-based ionic liquids are frequently employed as alternative low-volatility reaction media and anti-bacterial agents. Their synthesis via microwave irradiation provides

a high-efficiency route to these materials. Beyond their role as reaction media, imidazole-derived compounds also serve as functional materials. Moreover, the use of amino acid-derived imidazoles as corrosion inhibitors demonstrates how green synthetic metrics (high AE, low E-factor) can lead to environmentally friendly functional materials that protect infrastructure without releasing toxic substances into the marine environment.

Industrial Feasibility and Scalability

The assessment of industrial feasibility suggests that while "on-water" and solvent-free methods are highly attractive, they face challenges in heat dissipation and mass transfer at very large scales. Continuous-flow technologies offer one promising approach to addressing these limitations. Flow systems allow precise control of reaction conditions, heat transfer, and residence time, and can be integrated with microwave or ultrasound activation when appropriate. The fact that many of these green products can be isolated by simple filtration rather than energy-intensive distillation or chromatography is a major economic incentive for industrial adoption.

From an industrial perspective, the attractiveness of green HKA synthesis is closely linked to process simplification. Reduced solvent consumption, elimination of chromatographic purification, shorter reaction times, and the possibility of catalyst recycling contribute directly to lower operating costs and reduced energy demand. These factors may partially offset the costs associated with specialized equipment such as ball mills, microwave reactors, or continuous-flow systems.

Overall, the diverse applications of imidazolidine-based systems in agriculture, medicine, materials science, and corrosion protection demonstrate the broad practical relevance of these compounds. At the same time, the development of sustainable synthetic methodologies enhances their industrial attractiveness by reducing waste generation, energy consumption, and dependence on hazardous reagents. Although challenges related to scale-up and process optimization remain, the combination of green chemistry principles with the intrinsic versatility of HKAs provides a strong foundation for the future development of sustainable industrial processes based on HKA chemistry.

CONCLUSIONS

The synthesis and functionalization of imidazolidine-based systems have undergone substantial development over the past fifteen years, evolving from predominantly conventional synthetic approaches toward methodologies increasingly aligned with the principles of green chemistry. The literature reviewed demonstrates that heterocyclic ketene aminals (HKAs) constitute highly versatile building blocks capable of participating in multicomponent,

cascade, and regioselective transformations that provide rapid access to structurally complex heterocyclic frameworks. The unique push–pull electronic structure of HKAs facilitates efficient functionalization under mild reaction conditions, enabling the development of sustainable synthetic methodologies with high regioselectivity and step economy.

The most significant advances have been associated with the replacement of hazardous solvents by water, ethanol, and deep eutectic solvents, the development of solvent-free and mechanochemical protocols, the implementation of recyclable catalytic systems, and the adoption of energy-efficient activation techniques such as microwave irradiation and ultrasound. These approaches have improved the sustainability of synthetic processes while generally maintaining high levels of reaction efficiency, selectivity, and product yield.

At the same time, the review highlights the importance of evaluating sustainability using comprehensive quantitative metrics rather than relying solely on qualitative "green" claims. Although numerous studies report excellent yields and operational simplicity, parameters such as Process Mass Intensity, Reaction Mass Efficiency, life-cycle assessment, and solvent-adjusted E-factors remain insufficiently reported. Consequently, objective comparison of alternative methodologies is often difficult.

The analysis of the reviewed literature leads to several general conclusions.

Green chemistry strategies applied to HKA synthesis demonstrably improve environmental profiles without systematic sacrifice of yield or selectivity.

Water emerges as the most versatile and broadly applicable solvent substitute across the reaction types surveyed, offering kinetic benefits, simplified workup, and elimination of occupational hazards.

Solvent elimination (solvent-free and mechanochemical approaches) is most effective when coupled with careful optimization of reagent purity and product isolation protocols.

Multicomponent reactions in green media represent the highest-efficiency strategy, combining atom economy, step economy, and reduced waste generation in a single operation.

Despite the substantial progress achieved over the past decade, several scientific and technological challenges remain unresolved. Analysis of the current literature reveals a number of research directions that could further enhance the sustainability, efficiency, and industrial applicability of HKA-based synthetic methodologies.

Based on the gaps and limitations identified in the reviewed literature, the following directions appear most promising for future research:

– Systematic optimization of solvent-free routes to HKA precursors, with attention to reagent purity, mixing efficiency, and scalable isolation procedures.

– Development of integrated off-gas and byproduct capture systems for reactions generating volatile or malodorous side-products such as thiols, enabling greener process profiles at preparative scale.

– Broader reporting of full mass balances, solvent-adjusted E-factors, and life-cycle assessments for HKA syntheses, to allow meaningful cross-study comparison of green metrics.

– Exploration of catalytic activation in aqueous systems – including organocatalysis, photocatalysis, and biocatalysis – as routes to enantioselective HKA functionalization under physiological or near-physiological conditions.

– Application of machine learning and AI-assisted optimization to predict the reaction conditions that simultaneously minimize waste and maximize atom economy for complex multicomponent assemblies involving imidazolidine scaffolds.

SUMMARY

This review examines recent advances in the sustainable synthesis and functionalization of imidazolidine-based systems, with particular emphasis on heterocyclic ketene aminals (HKAs) as versatile building blocks for heterocyclic chemistry. The analysis covers literature published between 2010 and 2025 and focuses on the application of green chemistry principles to the construction of structurally complex imidazolidine derivatives. Special attention is given to solvent-free and mechanochemical methodologies, the use of environmentally benign reaction media such as water, ethanol, and deep eutectic solvents, as well as recyclable catalytic systems and energy-efficient activation techniques. The role of the unique electronic structure of HKAs in promoting regioselective and multicomponent transformations under mild conditions is discussed. Comparative evaluation of sustainable synthetic strategies demonstrates the advantages of multicomponent and cascade reactions in terms of atom economy, step economy, and waste minimization. Current trends in green HKA chemistry reveal a shift from simple solvent substitution toward integrated approaches combining resource efficiency, catalyst recyclability, and alternative energy inputs. The review also considers the practical applications of imidazolidine-based compounds in agriculture, medicinal chemistry, materials science, and corrosion protection, together with aspects of industrial feasibility and scalability. Particular attention is devoted to the critical assessment of sustainability metrics and the limitations of qualitative “green” claims in the absence of comprehensive quantitative evaluation. The findings highlight the considerable potential of HKA-based methodologies for the development of more sustainable synthetic processes and identify key directions for future research in green heterocyclic chemistry.

Bibliography

1. Фіголь М. П., Харченко Ю. В. Особливості синтезу кетенаміналей. *Природничі науки*. 2019. № 16. С. 86–89.

2. Albalawi A., El-Sayed W., Aljuhani A., Almutairi S., Rezki N., Aouad M., Messali M. Microwave-Assisted Synthesis of Some Potential Bioactive Imidazolium-Based Room-Temperature Ionic Liquids. *Molecules*. 2018. Vol. 23. Article 1727. DOI: 10.3390/molecules23071727.

3. Chanu L. G., Singh O. M., Jang S. H., Lee S. G. Regioselective Synthesis of Heterocyclic Ketene N,N-, N,O- and N,S-Acetals in Aqueous Medium. *Bulletin of the Korean Chemical Society*. 2010. Vol. 31, No. 4. P. 859–862. DOI: 10.5012/bkcs.2010.31.04.859.

4. Chen L., Huang R., Du X. X., Yan S. J., Lin J. One-Pot Synthesis of Highly Functionalized Bicyclic Imidazopyridinium Derivatives in Ethanol. *ACS Sustainable Chemistry & Engineering*. 2017. Vol. 5, No. 2. P. 1899–1905. DOI: 10.1021/acssuschemeng.6b02622.

5. Colacino E., Porcheddu A., Halasz I., Charnay C., Delogu F., Guerra R., Fullenwarth J. Mechanochemistry for "No Solvent, No Base" Preparation of Hydantoin-Based Active Pharmaceutical Ingredients: Nitrofurantoin and Dantrolene. *Green Chemistry*. 2018. Vol. 20, No. 13. P. 2973–2977. DOI: 10.1039/C8GC01345D.

6. Constable D., Curzons A., Cunningham V. Metrics to "Green" Chemistry – Which Are the Best? *Green Chemistry*. 2002. Vol. 4. P. 521–527. DOI: 10.1039/B206169B.

7. Fu L., Lin W., Hu M.-H., Liu X.-C., Huang Z.-B., Shi D.-Q. Efficient Synthesis of Functionalized Benzo[b][1,8]naphthyridine Derivatives via Three-Component Reaction Catalyzed by L-Proline. *ACS Combinatorial Science*. 2014. Vol. 16, No. 5. P. 238–243. DOI: 10.1021/co4001524.

8. Hooshmand E., Ziyaei A. Nitroalkenes in Diverse Synthesis of Heterocyclic Compounds with Two or Three Heteroatoms: Recent Advances. *Targets in Heterocyclic Systems*. 2019. Vol. 22. DOI: 10.17374/targets.2019.22.119.

9. Kasana S., Kurmi B., Patel P. Green Synthesis of Pyridine and Their Fused System: Harnessing the Catalytic Power of Ionic Liquids for Sustainable and Efficient Multicomponent Reaction. *Current Organic Chemistry*. 2024. Vol. 29. DOI: 10.2174/0113852728331797240903101654.

10. Kong L., Yan S., Lin J. Heterocyclic Ketene Aminals: Leading Molecules to Construct Molecular Diversity Fused Heterocyclic Compounds. *Progress in Chemistry*. 2018. Vol. 30, No. 5. P. 639–657. DOI: 10.7536/PC171208.

11. Kumari M., Haribabu N. Green Multicomponent Reactions for the Synthesis of Biologically Relevant Heterocycles: A Sustainable Approach.

International Journal of Novel Research and Development. 2025. Vol. 10. DOI: 10.56975/ijnrd.v10i7.308394.

12. Li M., Shao P., Wang S.-W., Kong W., Wen L.-R. Four-Component Cascade Heteroannulation of Heterocyclic Ketene Aminals: Synthesis of Functionalized Tetrahydroimidazo[1,2-a]pyridine Derivatives. *The Journal of Organic Chemistry*. 2012. Vol. 77, No. 20. P. 8956–8967. DOI: 10.1021/jo3013836.

13. Li M., Zhou Z.-M., Wen L.-R., Qiu Z.-X. Chemistry of Heterocyclic Ketene Aminals: Construction of Imidazo(pyrido)[1,2-a]pyridines and Imidazo(pyrido)[3,2,1-ij][1,8]naphthyridines via DABCO-Catalyzed Tandem Annulations. *The Journal of Organic Chemistry*. 2011. Vol. 76, No. 9. P. 3054–3063. DOI: 10.1021/jo102167g.

14. Luo D. Y., Hu X. M., Huang R., Cui S. S., Yan S. J. Base-Promoted Relay Reaction of Heterocyclic Ketene Aminals with o-Difluorobenzene Derivatives for the Highly Site-Selective Synthesis of Functionalized Indoles. *Tetrahedron*. 2021. DOI: 10.1016/j.tet.2021.132275.

15. Luo K., Chen Y. Z., Chen L. X., Wu L. Autoxidative C(sp^2)–P Formation: Direct Phosphorylation of Heteroarenes under Oxygen, Metal-Free, and Solvent-Free Conditions. *The Journal of Organic Chemistry*. 2016. Vol. 81, No. 11. P. 4682–4689. DOI: 10.1021/acs.joc.6b00592.

16. Messali M., Aouad M. R., El-Sayed W. S., Al-Sheikh Ali A., Ben Hadda T., Hammouti B. New Eco-Friendly 1-Alkyl-3-(4-phenoxybutyl) Imidazolium-Based Ionic Liquids Derivatives: A Green Ultrasound-Assisted Synthesis, Characterization, Antibacterial Activity and POM Analyses. *Molecules*. 2014. Vol. 19, No. 8. P. 11741–11759. DOI: 10.3390/molecules190811741.

17. Mohamed S., Simpson J., Marzouk A., Talybov A., Abdelhamid A., Abdullayev Y., Abbasov V. Multicomponent Green Synthesis, Spectroscopic and Structural Investigation of Multi-Substituted Imidazoles. Part 1. *Zeitschrift für Naturforschung B*. 2015. Vol. 70. DOI: 10.1515/znb-2015-0067.

18. Mohlala R. L., Rashamuse T., Coyanis E. Highlighting Multicomponent Reactions as an Efficient and Facile Alternative Route in the Chemical Synthesis of Organic-Based Molecules: A Tremendous Growth in the Past 5 Years. *Frontiers in Chemistry*. 2024. Vol. 12. DOI: 10.3389/fchem.2024.1469677.

19. Orlov V. D., Kharchenko Yu. V., Gella I. M., Omel'chenko I. V., Shishkin O. V. Reactions of Ketene Aminals with N-Arylmaleimides and Dimethyl Acetylenedicarboxylate, a Direct Pathway to Derivatives of Pyrrolo[1,2-a]imidazole and Imidazo[1,2-a]pyridine. *Chemistry of Heterocyclic Compounds*. 2012. Vol. 48, No. 8. P. 1204–1212.

20. Phadtare S. B., Vijayraghavan R., Shankarling G. S., MacFarlane D. R. Efficient Synthesis of 2,3-Dihydro-1H-Perimidine Derivatives Using HBOB as

a Novel Solid Acid Catalyst. *Australian Journal of Chemistry*. 2012. Vol. 65. P. 86–90. DOI: 10.1071/CH11381.

21. Rahimi Z., Bayat M., Hosseini H. A Highly Chemo- and Regioselective Synthesis of Heterocyclic [3.3.3]Propellanes via Sequential Multicomponent Reactions in Water. *Scientific Reports.* 2025. Vol. 15, 27969. DOI: 10.1038/s41598-025-13577-0.

22. Ran X., Zhou Q., Zhang J., Wang S., Wang G., Yang H., Liu X., Wang Z., Yu X. A Solvent-Free and Efficient Synthesis of Bicyclic 2-Pyridone Derivatives for Endoplasmic Reticulum Imaging. *Organic Chemistry Frontiers*. 2021. Vol. 8. DOI: 10.1039/D1QO00350J.

23. Saeedi M., Khoshdoun M., Mohammadi A., Halvagar M., Amani V. Synthesis of Functionalized Bicyclic Pyridones Containing Dithiocarbamate Group Using Thioazlactones, Diamines and Nitroketene Dithioacetal. *SynOpen.* 2021. DOI: 10.1055/a-1492-9229.

24. Saha S., Pinheiro A. B., Chatterjee A., Bhutia Z. T., Banerjee M. A Solvent-Free Mechanochemical Electrophilic C–H Thiocyanation of Indoles and Imidazo[1,2-a]pyridines Using a Cost-Effective Combination of N-Chlorosuccinimide–NaSCN. *Green Chemistry*. 2024. DOI: 10.1039/D4GC00486H.

25. Salis C., Mohammedi S., Turazza L., Blandin Y., Garnier M., Hemmert C., Baltas M., Gornitzka H. Mechanochemistry to Form Substituted Imidazoles, Imidazolium Salts and NHC–Gold Complexes with Fluorine-Containing Groups. *Molecules*. 2025. Vol. 30, No. 3. Article 522. DOI: 10.3390/molecules30030522.

26. Sangi D., Monteiro J., Vanzolini K., Cass Q., Paixão M., Correa A. Microwave-Assisted Synthesis of N-Heterocycles and Their Evaluation Using an Acetylcholinesterase Immobilized Capillary Reactor. *Journal of the Brazilian Chemical Society*. 2014. DOI: 10.5935/0103-5053.20140056.

27. Savych I., Ejaz S. A., Shah S. J. A., Iaroshenko V. O., Villinger A., Sosnovskikh V. Y., Iqbal J., Abbasi A., Langer P. Reactions of 3-Acylchromones with Heterocyclic Ketene Aminals: One-Pot Synthesis and Phosphatase Inhibitory Activity of Fused Pyridine Derivatives. *European Journal of Organic Chemistry*. 2017. P. 186–202. DOI: 10.1002/ejoc.201601138.

28. Shaabani A., Hooshmand S. E., Tabatabaei A. T. Synthesis of fully substituted naphthyridines: A novel domino four-com-ponent reaction in a deep eutectic solvent system based oncholine chloride/urea. *Tetrahedron Lett.* 2016. Vol. 57. P. 351–353.

29. Vala M., Bayat M., Bayat Y. One-pot Synthesis of Dihydro-8H-acenaphtho[1′,2′:4,5]pyrrolo[1,2-a]imidazole-diol Derivatives. *Molecular Diversity*. 2021. Vol. 25. DOI: 10.1007/s11030-020-10078-2.

30. Wang S.-Y., Zhang Z.-W., Yuan L., Jin Y., Zhang C.-H., Lin J. Efficient Synthesis of Bicyclic 2-Pyridinones and 6-Amino-2-pyridinones by the Regioselective Cycloaddition of Nitro Ketene Aminal with 3-Hydroxy-2-aryl-acrylate. *European Journal of Organic Chemistry*. 2022. No. 26. DOI: 10.1002/ejoc.202201268.

31. Wen L. R., Li M., Wang L. J. Synthesis of Imidazo[1,2-a]pyridines and Pyrido[1,2-a]pyrimidines in Water and Their SNAr Cyclizations. *Bulletin of the Korean Chemical Society*. 2014. Vol. 35, No. 4. P. 995–1000. DOI: 10.5012/bkcs.2014.35.4.995.

32. Wen L. R., Liu C., Li M., Wang L. J. Modulating the Reactivity of Heterocyclic Ketene Aminals in MCR: Selective Construction of Tetrahydrobenzo[b]imidazo[3,2,1-ij]naphthyridines. *The Journal of Organic Chemistry*. 2010. Vol. 75, No. 22. P. 7605–7614. DOI: 10.1021/jo101454q.

33. Yaqub M., Batool J., Mahmood K., Ashraf A., Perveen R., Shafiq Z. Regioselective Synthesis of Fused Ring Heterocyclic Derivatives of Ketene Aminals and Their Biological Activities. *Journal of Heterocyclic Chemistry.* 2020. DOI: 10.1002/jhet.4014.

34. Yu F., Yan S., Hu L., Wang Y., Lin J. Cascade Reaction of Isatins with Heterocyclic Ketene Aminals: Synthesis of Imidazopyrroloquinoline Derivatives. *Organic Letters.* 2011. Vol. 13, No. 18. P. 4782–4785. DOI: 10.1021/ol201783d.

35. Yu X.-L., Fan Y.-H., Zheng X.-N., Gao J.-F., Zhuang L.-G., Yu Y.-L., Xi J.-H., Zhang D.-W. Synthesis of Imidazole-Based Molecules under Ultrasonic Irradiation Approaches. *Molecules*. 2023. Vol. 28, No. 12. Article 4845. DOI: 10.3390/molecules28124845.

36. Zendehdel M., Mobinikhaledi A., Alikhani H., Jafari N. Preparation of Heteropoly Acid/Porous Hybrid Materials and Investigation of Their Catalytic Behavior in the Synthesis of Perimidine. *Journal of the Chinese Chemical Society*. 2010. Vol. 57. P. 683–689. DOI: 10.1002/jccs.201000095.

Information about the author:
Kharchenko Yuliia,
Candidate of Chemical Sciences,
Associate Professor at the Department of Human Biology, Chemistry
and Methodology of Teaching Chemistry
Sumy State Pedagogical University named after A. S. Makarenko
87, Romenska Street, Sumy, Ukraine

03
SECTION

PHYSICAL GEOGRAPHY, SOCIO-GEOGRAPHICAL TRANSFORMATIONS OF TERRITORIES, AND SPATIAL MODELLING

CHAPTER 28

ECOLOGICAL AND GEOGRAPHICAL FOUNDATIONS FOR THE SUSTAINABLE DEVELOPMENT OF NATIONAL NATURE PARKS IN THE UKRAINIAN CARPATHIANS

Basiuk Tetiana, Romaniv Andriy
DOI https://doi.org/10.30525/978-9934-26-714-7-28

INTRODUCTION

The current stage of civilizational development necessitates the integration of the sustainable development concept into all spheres of socio-spatial and economic activity. Given their heightened vulnerability to external factors and their key role in maintaining the ecological balance of continents, mountain regions require special attention in the context of spatial modeling and conservation management. The Ukrainian Carpathians represent a unique biogeographic region in Central Europe. A complex orographic structure, specific microclimatic conditions, and prolonged landscape genesis have resulted in a high concentration of endemic and relict flora and fauna, as well as the preservation of primeval forest ecosystems. At the same time, this specific mountain region is currently becoming an arena of intensive socio-ecological transformations.

The core problem is that the natural-territorial complexes of the Carpathians are experiencing intensive synergistic pressure. On the one hand, there is a spontaneous commercialization of the recreational and tourism potential, accompanied by chaotic infrastructure development, the expansion of the ski trail network, and the spread of motorized extreme tourism (jeeping, enduro), which cause irreversible degradation of the soil and vegetation cover. On the other hand, intensive, and sometimes illegal, logging continues, undermining the water-regulating and soil-protecting functions of forest ecosystems and provoking the activation of hazardous exogenous geomorphological processes – mudflows, landslides, and catastrophic floods[1].

[1] Круглов І. С. Трансформація ландшафтів Українських Карпат. *Український географічний журнал*. 2018. № 3. С. 14–22. DOI: 10.15407/ugz2018.03.014

The results of fundamental research in the fields of geoecology and biogeography convincingly demonstrate that expanding the network of Nature Reserve Fund (NRF) sites is the most effective tool for conserving landscape and biological diversity[2]. Within the system of NRF categories, national nature parks (NNPs) are considered the most adaptive and balanced form of spatial protection. Their spatial structure, based on the principles of functional zoning, conceptually enables the harmonization of a strict protection regime in high-value areas with traditional natural resource use and regulated recreation in the remaining territories[3].

However, the practical functioning of Carpathian NNPs demonstrates that the institutional establishment of protected status does not automatically eliminate the contradictions between the socio-economic interests of local communities and the imperatives of ecocentrism. The uncertainty and lack of boundaries demarcated on the ground, the chronic funding deficit for conservation measures, and outdated forestry and hunting management practices within the economic zones of the parks cause permanent spatial and resource conflicts. Overcoming these contradictions requires rethinking traditional protected area management paradigms and integrating innovative tools for geospatial analysis and adaptive management.

The aim of the study is to conduct a comprehensive analysis of the spatial and ecological-economic aspects of natural resource use within the national nature parks of the Ukrainian Carpathians in order to substantiate the scientific and methodological foundations for optimizing their functioning based on sustainability principles. In accordance with this objective, the subsequent subsections detail the scale of contemporary socio-geographical transformations of protected areas, assess the consequences of the recreational degradation of landscapes, and propose strategic vectors for the modernization of the ecological management of mountain ecosystems. Ultimately, the practical implementation of these recommendations is expected to harmonize biodiversity conservation with the socio-economic needs of local communities, ensuring the long-term resilience of the Carpathian natural heritage.

1. Formation and Current State of the National Nature Park Network in the Ukrainian Carpathians

The mountain landscape ecosystems of the Ukrainian Carpathians represent a unique natural complex that plays a crucial role in maintaining ecological balance, shaping the hydrological regime, and conserving the biological diversity

[2] Голубець М. А. Екосистемологія. Львів : Поліграфцентр, 2000. 316 с.

[3] Стойко С. М. Охорона природи Українських Карпат та прилеглих територій. Київ : Наукова думка, 1980. 261 с.

of the region[4, 5]. At the same time, the prolonged anthropogenic transformation of forest ecosystems and the intensive economic development of mountainous areas have significantly increased the risks of negative ecological processes, including catastrophic floods, soil erosion, and the loss of biotic potential[6, 7]. Under these conditions, a need arises to develop a balanced system of natural resource use, where the territories and sites of the Nature Reserve Fund (NRF) serve as the key spatial framework[8, 9].

National nature parks (NNPs) hold a prominent place within the system of preserving conservation potential. Unlike strict nature reserves, the functional structure of NNPs enables the integration of natural heritage conservation objectives with meeting the recreational, scientific, and socio-economic needs of the local population[10]. The development of the national park network is viewed as a strategic direction for ensuring the sustainable development of mountainous areas, as it creates the conditions for a transition from resource-depleting forestry to the development of the recreation industry and ecotourism[11, 12].

The establishment and spatial development of the national park network in the Ukrainian Carpathians are based on the system of legislative acts of Ukraine. The fundamental legal framework is provided by the Law of Ukraine «On the Nature Reserve Fund of Ukraine» which defines the status, legal regime, and functional zoning of national nature parks[13]. The development of ecological corridors and the integration of fragmented protected areas into a unified spatial system were carried out in accordance with the Law of Ukraine «On the State Programme for the Formation of the National Ecological Network of Ukraine

---

[4] Заповідні екосистеми Карпат / С. М. Стойко та ін. Львів : Світ, 1991. 248 с.

[5] Мельник А. В. Українські Карпати: еколого-ландшафтознавче дослідження. Львів, 1999. 288 с.

[6] Коваль Я. В., Антоненко І. Я. Значення гірських лісів у системі екологічної безпеки. *Гори і люди (у контексті сталого розвитку)* : матер. Міжнар. наук.-практ. конф. Ужгород : Патент, 2002. Т. ІІ. С. 381–385.

[7] Олійник В. С. Паводкорегулююча роль гірських лісів Карпат. *Екологічні та соціально-економічні аспекти катастрофічних стихійних явищ у Карпатському регіоні (повені, селі, зсуви)* : матер. Міжнар. наук.-практ. конф. Рахів, 1999. С. 257–260.

[8] Про природно-заповідний фонд України : Закон України. *Відомості Верховної Ради України*. 1992. № 34. Ст. 502.

[9] Заповідники і національні природні парки України. Київ : Вища школа, 1999. 232 с.

[10] Кукурудза М. М. Менеджмент національних парків : навчальний посібник. Львів : Видавничий центр ЛНУ ім. Івана Франка, 2003. 127 с.

[11] Жук П. В., Кравців В. С. Рекреаційний потенціал Українських Карпат і перспективи його використання. *Українські Карпати: проблеми і перспективи* : матер. Міжнародн. наук.-практ. конф. Львів, 1993. С. 58.

[12] Рожко І. М. Рекреаційна оцінка гірських природно-територіальних комплексів для потреб туризму (на прикладі Українських Карпат) : автореф. дис. … канд. геогр. наук : 11.00.11. Львів, 2000. 175 с.

[13] Про природно-заповідний фонд України : Закон України. *Відомості Верховної Ради України*. 1992. № 34. Ст. 502.

for 2000–2015»[14] and the Law of Ukraine «On the Ecological Network of Ukraine»[15].

The legislative establishment of the functional zoning of NNPs (strict protection zone, regulated recreation zone, stationary recreation zone, and economic zone) allows the most valuable natural complexes to be excluded from intensive use, while simultaneously retaining opportunities for traditional land management and recreational activities[16].

The contemporary network of national nature parks encompasses the main geomorphological and geobotanical regions of the Ukrainian Carpathians – from the low-mountain foothills to the high-mountain massifs of Chornohora, Gorgany, and the Beskids[17, 18]. The recreational resource potential of mountain natural-territorial complexes serves as an important foundation for the development of hiking, educational, balneological, ski, and other types of active tourism[19]. At the same time, the continuous growth of tourist flows leads to intensified anthropogenic pressure on vulnerable mountain ecosystems, which necessitates appropriate monitoring.

For the purpose of systematization and comparative geographical analysis, Table 1 summarizes the key information regarding the main national nature parks of the region.

The formation and expansion of the NNPs network play a significant role in ensuring the ecological safety and sustainable development of the region across several main directions:

- *Water conservation and flood control functions.* Mountain forest ecosystems, excluded from intensive clear-cutting within national parks, act as natural accumulators of atmospheric precipitation, convert surface runoff into groundwater recharge, and significantly reduce peak flood levels in the Dniester, Prut, Tisza, and Cheremosh river basins[20, 21].

---

[14] Про Загальнодержавну програму формування національної екологічної мережі України на 2000–2015 роки : Закон України. *Відомості Верховної Ради України*. 2000. № 47. С. 40.

[15] Про екологічну мережу України : Закон України. *Відомості Верховної Ради України*. 2004. № 45. Ст. 502.

[16] Кукурудза М. М. Менеджмент національних парків : навч. посіб. Львів : Видавничий центр ЛНУ ім. Івана Франка, 2003. 127 с.

[17] Заповідні екосистеми Карпат / С. М. Стойко та ін. Львів : Світ, 1991. 248 с.

[18] Мельник А. В. Українські Карпати: еколого-ландшафтознавче дослідження. Львів, 1999. 288 с.

[19] Жук П. В., Кравців В. С. Рекреаційний потенціал Українських Карпат і перспективи його використання. *Українські Карпати: проблеми і перспективи* : матер. Міжнародн. наук.-практ. конф. Львів, 1993. С. 58.

[20] Коваль Я. В., Антоненко І. Я. Значення гірських лісів у системі екологічної безпеки. *Гори і люди (у контексті сталого розвитку)* : матер. Міжнар. наук.-практ. конф. Ужгород : Патент, 2002. Т. ІІ. С. 381–385.

[21] Олійник В. С. Паводкорегулююча роль гірських лісів Карпат. *Екологічні та соціально-економічні аспекти катастрофічних стихійних явищ у Карпатському регіоні (повені, селі, зсуви)* : матер. Міжнар. наук.-практ. конф. Рахів, 1999. С. 257–260.

Table 1

Characteristics of the National Nature Parks of the Ukrainian Carpathians

Name of the National Nature Park	Geographical (basin) location	Main conservation and recreational features
Carpathian NNP	Ivano-Frankivsk Oblast, upper reaches of the Prut River basin	The first NNP in Ukraine; encompasses the high-altitude massifs of Chornohora (Mt. Hoverla); high level of recreational development and tourist infrastructure
«Synevyr» NNP	Zakarpattia Oblast, Tereblya River basin	Preservation of Inner Gorgany landscapes, high-mountain bogs, and Lake Synevyr; assessment and modeling of climate and tourism resources
Uzhanskyi NNP	Zakarpattia Oblast, Uzh River basin	Part of the trilateral East Carpathians Biosphere Reserve; protection of primeval beech forests and mountain ecosystems of the Beskids
«Skole Beskids» NNP	Lviv Oblast, Stryi and Opir River basins	Protection of silver fir and beech forests of the Eastern Beskids; significant recreational potential and availability of balneological resources
«Hutsulshchyna» NNP	Ivano-Frankivsk Oblast, Pokuttya-Bukovyna Carpathians	Combination of natural landscape protection with the preservation of ethnocultural heritage and traditional crafts of Hutsulshchyna
«Verkhovynskyi» NNP	Ivano-Frankivsk Oblast, Cheremosh River basin	Protection of high-mountain ecosystems of the Chyvchyny-Hrynyava Mountains; conservation of intact forest and subalpine complexes
«Boykivshchyna» NNP	Lviv Oblast, upper reaches of the Dniester River basin	Preservation of natural-territorial complexes of the Eastern Beskids and the distinctive cultural heritage of the Boyko region
«Korolivski Beskydy» NNP	Lviv Oblast, Dniester River basin	Formation of ecological corridors in the Carpathian foothills; protection of forest areas and recreation development

- *Biodiversity and landscape diversity conservation.* National parks ensure the protection of rare and endangered species of flora and fauna listed in the Red Data Book of Ukraine, as well as the safeguard of rare phytocoenoses (plant communities)[22, 23].
- *Socio-economic diversification.* The development of national park management stimulates the creation of new jobs in the service sector, research activities, park inspection, and guided tour services[24]. The network of tourist and ecological trails, designed on a landscape-ecological basis, makes it possible

[22] Заповідні екосистеми Карпат / С. М. Стойко та ін. Львів : Світ, 1991. 248 с.

[23] Заповідники і національні природні парки України. Київ : Вища школа, 1999. 232 с.

[24] Кукурудза М. М. Менеджмент національних парків : навчальний посібник. Львів : Видавничий центр ЛНУ ім. Івана Франка, 2003. 127 с.

to reduce unregulated recreational pressure on vulnerable high-mountain ecosystems[25, 26].

Thus, the development of the national nature park network in the Ukrainian Carpathians is a fundamental condition for ensuring sustainable development, preserving the unique natural and landscape heritage while simultaneously laying the groundwork for the socio-economic growth of local communities.

2. Ecological Risks and Anthropogenic Transformation of Mountain Landscapes

Forest and aquatic ecosystems of the Ukrainian Carpathians serve as the foundation for the region's ecological stability, providing climate-regulating, soil-protective, and water-regulating functions. However, over recent decades, they have been subject to high technogenic and economic pressure, which comes into systemic contradiction with the sozological tasks of biodiversity conservation, particularly within protected areas. The key factors of spatial-ecological degradation are depleting forest use (manipulations with sanitary fellings, illegal logging) and the expansion of small-scale hydropower in the mountain river basins.

Impact of unsustainable forest management on NNP ecosystems

Despite the protected status of the territories, forestry activities within the economic and regulated recreation zones of NNPs remain highly intensive. The widespread practice of assigning clear sanitary fellings causes particular concern among the scientific and conservation communities. While formally intended to improve the sanitary state of forests and eliminate foci of pest infestations (specifically the European spruce bark beetle, Ips typographus, in monocultures of secondary spruce forests), in reality, they often serve as a legalized instrument for extracting commercially valuable industrial timber[27].

These processes lead to a reduction in the area of old-growth forests and the spatial fragmentation of continuous forest massifs. The elimination of critical microhabitats (in particular, deadwood and defective trees) disrupts the life cycles of rare representatives of ornithofauna and entomofauna, as well as xylotrophic mycobiota.

---

[25] Рожко І. М. Рекреаційна оцінка гірських природно-територіальних комплексів для потреб туризму (на прикладі Українських Карпат) : автореф. дис. … канд. геогр. наук : 11.00.11. Львів, 2000. 175 с.

[26] Романів А. С., Романів О. Я. Обґрунтування мережі туристичних маршрутів Національного природного парку «Синевир» на засадах ландшафтознавчих досліджень. *Фізична географія та геоморфологія*. 2004. Вип. 46, Т. 1. С. 243–250.

[27] Чернявський М. В. Проблеми збереження старовікових лісів та пралісів Українських Карпат. *Науковий вісник НЛТУ України*. 2016. Вип. 26.4. С. 120–128.

Illegal logging deepens ecological degradation, disrupting not only the spatial structure of biogeocenoses but also the physicochemical properties of the soil cover. Direct consequences of failing to comply with environmental logging regulations and utilizing heavy tracked machinery for timber skidding along stream beds include the loss of the water-regulating capacity of mountain slopes. This causes the intensification of surface runoff during heavy rainfall, the activation of erosion processes, and the formation of destructive floods in the lower reaches of river basins[28]. The typology of logging and its geoecological consequences for mountain ecosystems are summarized in Table 2.

Table 2

Typology of logging and its ecological consequences in mountain ecosystems

Type of Anthropogenic Intervention	Primary Ecological Risk	Impact on Structural Components of the Biogeocenosis
Clear sanitary fellings	Destruction of old-growth trees and microhabitats	Biodiversity reduction, alteration of microclimatic conditions, disruption of trophic chains
Illegal logging	Soil cover degradation and activation of erosion	Decline in the water-regulating capacity of slopes, increased risk of landslides and mudflows
Timber skidding along stream beds	Development of linear erosion. Mechanical damage to undergrowth and the hydrological network	Soil compaction, siltation of mountain rivers, destruction of fish spawning grounds

Ecological risks of hydropower development in mountain rivers

The second significant factor of destructive technogenic pressure is the mass construction of small hydropower plants. Starting in the 2010s, against the backdrop of promoting renewable («green») energy and introducing the «green tariff» mechanism, the intensive construction of diversion hydropower plants gained momentum in the Carpathian region. The operational scheme of such facilities involves damming the watercourse and diverting a significant portion of the river flow (up to 80–90%) into diversion pipelines over distances ranging from several hundred meters to several kilometers[29].

For mountain watercourses, which are inherently highly sensitive to transformations of the hydrological regime, such interventions have destructive consequences. On river reaches between the intake facility and the discharge

[28] Олійник В. С. Гідрологічна роль лісів Українських Карпат. Івано-Франківськ : НАІР, 2013. 232 с.

[29] Ковальчук А. А. Екологічні проблеми розвитку малої гідроенергетики в Українських Карпатах. *Гідрологія, гідрохімія і гідроекологія*. 2018. № 2(49). С. 56–65.

point (within the diversion reach), a critical decrease in water levels, disruption of the flow velocity profile, seasonal overheating of water masses during the summer period, and the emergence of a persistent dissolved oxygen deficit are observed. Hydrotechnical structures of SHPs form impassable mechanical barriers to the spawning migrations of rheophilic ichthyofauna species–specifically brown trout (Salmo trutta m. fario), European grayling (Thymallus thymallus), Danube salmon (Hucho hucho), and Balkan barbel (Barbus petenyi), most of which are listed in the Red Data Book of Ukraine and are protected under the Bern Convention[30].

The comprehensive impact of diversion small hydropower plants on the hydro-ecosystems of Carpathian rivers is summarized in Table 3.

Table 3

Impact of diversion-type small hydropower plants on the ecosystems of Carpathian rivers

Project Implementation Stage	Primary Factor of Negative Impact	Ecological Consequences for the Hydro-Ecosystem
Infrastructure construction	Alteration of the natural riverbed, operation of heavy construction machinery	Destruction of natural spawning grounds, sharp increase in water turbidity, destruction of riparian protective zones
Operation (water diversion into pipeline)	Critical reduction of water discharge in the natural riverbed below the dam	Degradation of hydrobiocenoses, disappearance of stenobiontic (rheophilic) species, shallowing of the watercourse
Construction of retaining dams	Artificial fragmentation of the integrated river system	Blocking of fish migration routes to spawning areas, disruption of sediment transport

The synergistic effect of depleting forest management in watersheds and the regulation of watercourses by diversion structures manifests in the comprehensive degradation of natural-territorial complexes. Instead of fulfilling their sozological functions and carrying out environmental monitoring, territories adjacent to national nature parks are transforming into zones of intensive economic resource exploitation. This highlights the urgent need to improve the environmental impact assessment methodology and optimize the functional zoning of protected area network entities. Specifically, this involves the regulatory implementation of environmentally safe basin-based nature management standards and the establishment of effective buffer zones around core reserve zones. Only such a systemic geoecological approach will allow for

[30] Снігурець О. В. Вплив гідротехнічних споруд на іхтіофауну гірських річок. *Біологічні студії*. 2019. Т. 13, № 1. С. 95–104.

the restoration of the self-healing potential of Carpathian landscapes and ensure their sustainable spatial development in the long term.

The formation of the modern spatial structure of the high-altitude landscapes of the Ukrainian Carpathians was long determined by traditional nature management, in which polonyna livestock farming holds a primary role. On the one hand, moderate livestock grazing historically contributed to maintaining the biodiversity of subalpine meadows by inhibiting processes of their successional afforestation. On the other hand, under contemporary conditions of spatial limitation and intensification of economic activities within national nature parks, traditional cattle farming frequently transforms into a factor of systemic environmental destabilization.

Ecological consequences of unregulated grazing on high-altitude meadows (polonynas)

A key problem of modern polonyna management is the local exceedance of ecologically permissible grazing capacity (overgrazing) in the most accessible high-altitude areas. High livestock density within restricted areas induces the development of pasture digression processes. The result is a destructive transformation of phytocoenoses: valuable forage species and rare endemic plant components are displaced by low-value digression species resilient to trampling – specifically tufted hairgrass (Deschampsia cespitosa) and matgrass (Nardus stricta).

Alongside this, excessive mechanical pressure on the vulnerable soil cover causes its severe compaction, destruction of the sod layer, and disruption of the water-air regime. This significantly reduces the infiltration capacity of the surface, driving the activation of sheet erosion and the formation of a network of erosion rills, which subsequently transform into linear erosion landforms[31].

The intensification of these processes extends beyond mere soil destruction, impairing the water-regulating capacity of subalpine geosystems and the hydrological regime of Carpathian river basins. Long-term degradation of the plant-soil cover irreversibly reduces the biological productivity of polonynas, subsequently undermining the natural resource potential of traditional cattle farming itself. Under such conditions, the restoration of vulnerable high-altitude ecosystems requires the introduction of pasture rotation systems and the temporary withdrawal of the most severely degraded areas from economic use.

The sequence of these destructive processes, as well as the stages of pasture digression of polonyna landscapes and their diagnostic indicators, are summarized in Table 4.

[31] Кияк В. Г. Дигресія високогірних екосистем Українських Карпат під впливом пасовищного навантаження. *Екологія та ноосферологія*. 2017. Т. 28, № 1–2. С. 45–54.

Table 4

Stages of pasture digression of polonyna landscapes and their indicators

Digression Stage	Characteristics of Vegetation Cover	State of Soil Cover
I (Initial)	Slight reduction in the proportion of sensitive species, dominance of typical grasses	Preservation of turf integrity, minimal compaction of the upper horizon
II (Moderate)	Disappearance of endemics, spread of inedible herbs (*Nardus stricta*), dwarf shrubs	Soil exposure on 15–30% of the area, reduced water permeability, emergence of livestock trails
III (Severe)	Formation of impoverished ruderal communities, degradation of vegetation cover	Mechanical destruction of turf on 50–70% of the area, active sheet erosion
IV (Catastrophic)	Complete loss of forage value, fragmented vegetation cover	Exposure of parent rock, development of deep linear erosion, scree slopes

Recreational digression and the impact of mass tourism

Another, no less significant factor in the transformation of natural-territorial complexes is the rapid increase in recreational pressure. National nature parks of the Carpathian region experience systematic pressure due to the growth of unmanaged recreational flows. Although the organization of public recreation is among the priority functions of national nature parks, the lack of effective visitor management and modern tourism infrastructure leads to substantial geoecological destruction of protected areas[32].

The most common consequence of mass trekking is the expansion of recreational digression zones along popular routes (particularly on the Chornohora, Svydovets, and Gorgany massifs). In the absence of equipped and marked trails, hikers widen the transit zone to several dozen meters, causing complete destruction of the plant-soil cover. An extremely aggressive form of recreational nature use is the expansion of high-clearance off-road and motor vehicles (off-roading/jeeping, ATVs, and enduro motorcycles) beyond public roads. The movement of such vehicles along steep slopes and mountain riverbeds causes immediate and often irreversible damage to ecosystems: habitats of plant species listed in the Red Data Book of Ukraine are destroyed, bird nesting and amphibian breeding biotopes are disrupted, and a powerful acoustic disturbance factor is created[33].

Deep ruts left by heavy motor vehicles on treeless slopes transform into artificial channels that concentrate surface runoff during heavy rainfalls,

[32] Смалійчук А. Д. Рекреаційна трансформація ландшафтів Чорногірського масиву: сучасний стан та шляхи оптимізації. *Фізична географія та геоморфологія*. 2019. Вип. 1(93). С. 78–86.

[33] Волощук М. Д. Ерозійні процеси в Українських Карпатах та вплив рекреаційної діяльності на їх активізацію. Ужгород : Карпати, 2015. 190 с.

triggering the catastrophic development of linear erosion and landslides. The systematic presence of high-speed transport causes the fragmentation of contiguous faunal habitats, forcing large mammals (specifically the brown bear, Ursus arctos, and the Eurasian lynx, Lynx lynx) to abandon their traditional home ranges. This problem is further compounded by the lack of demarcated boundaries of national parks in the field and low fine rates, which makes effective operational control over motor vehicle movement in remote mountain areas impossible. This drives an urgent need not only to establish strict enforcement against unauthorized access within protected areas, but also to localize and channel such recreational activities onto dedicated tracks outside protected boundaries.

Systematized forms of recreational impact, their spatial distribution, and corresponding consequences for the landscape structure of NNPs are presented in Table 5.

Table 5

Forms of recreational impact and their consequences for landscapes of national nature parks

Type of Tourism Activity	Primary Impact Factor	Ecological Consequences for Natural-Territorial Complexes
Mass Hiking / Trekking	Trampling, uncontrolled campfire lighting, littering	Expansion of erosion trails, damage to forest advance growth, localized solid waste pollution
Off-Roading (Jeeping) & Motor Tourism	Mechanical soil damage by heavy vehicles, noise stress	Deep linear slope erosion, destruction of rare species populations, wildlife disturbance
Tent Camping	Concentration of anthropogenic load on small areas	Soil compaction at campsites, pollution of adjacent water bodies with organic matter

Such trends in the transformation of mountain geosystems – both under the influence of traditional forms of nature use and under the pressure of emerging recreational practices-clearly demonstrate the imperfection of existing spatial management models. The cumulative effect of overlapping drivers within areas with relaxed sozological regimes highlights the urgent need to substantiate integrated functional zoning mechanisms capable of mitigating spatial conflicts between economic interests and ecological safety imperatives[34].

[34] Мельник А. В. Функціональне зонування національних природних парків як інструмент збалансованого просторового розвитку. *Вісник Львівського університету. Серія географічна*. 2020. Вип. 54. С. 112–123.

3. Optimization of Spatial Structure and Innovative Management of Protected Areas

The severity of ecological-economic conflicts in the Carpathian region convincingly demonstrates that the current system of spatial organization of national nature parks (NNPs) has exhausted its potential and requires systemic modernization. The traditional model of functional zoning, established in the late 20th century, has proven incapable of flexibly responding to contemporary challenges: the rapid commercialization of recreational nature use, the expansion of small hydropower, and global climate transformations. In many Carpathian NNPs, a predominant share of the territory (sometimes over 50–60%) is allocated to the economic zone and the zone of stationary recreation, which de facto neutralizes the sozological function of the conservation institution [35].

A key instrument for resolving resource use conflicts should be a scientifically grounded reorganization of the spatial structure of NNPs. The modern approach requires shifting away from formal (administrative) division in favor of a landscape-ecological concept. The primary task is a substantial expansion of the core reserve zone, which must fulfill the function of a stabilizing ecological core of the territory. It is imperatively necessary to include all identified clusters of primary forests, quasi-primeval forests, and old-growth forest massifs, as well as first-order drainage basins, into this core zone. This will prevent any types of logging (including sanitary logging) and the construction of hydrotechnical structures in the most ecologically sensitive areas.

At the same time, the formation of an integrated sozological framework requires the creation of reliable buffer zones and local ecological corridors designed to eliminate landscape fragmentation and ensure the spatial connectivity of core reserve zones. Furthermore, the zoning of recreationally developed territories should rely on strict calculations of the ecological carrying capacity of landscapes, with a clear delineation and infrastructure setup of local tracks for sightseeing or extreme tourism outside reserve boundaries. The practical implementation of such a geospatial model based on GIS technologies will allow for minimizing existing resource use conflicts and establishing the groundwork for the long-term sustainable development of the entire mountain region[36].

A systematized list of updated criteria and spatial parameters for optimizing the functional zoning of NNPs in the Carpathian region is summarized in Table 6.

---

[35] Гетьман В. І. Еколого-географічні основи територіальної організації національних природних парків України. Київ : Інститут географії НАН України, 2018. 245 с.

[36] Брусак Е. І. Функціональне зонування гірських природоохоронних територій: проблеми та шляхи вирішення. *Вісник Львівського університету. Серія географічна*. 2021. Вип. 55. С. 34–45.

Table 6

Updated criteria for optimizing the functional zones of NNPs in the Carpathian region

Functional Zone of the NNP	Main Defect of the Existing State	New Delineation and Spatial Organization Criteria
Core Reserve Zone	Territorial fragmentation, insufficient area (often < 20%)	Coverage of no less than 30–40% of the park area; mandatory inclusion of primeval forests, subalpine/subnival zones, and river headwaters; formation of contiguous clusters
Zone of Regulated Recreation	Chaotic dispersion of tourists, slope digression (degradation)	Binding exclusively to marked trails; calculation of recreational carrying capacity; creation of «ecological corridors» for visitor transit
Zone of Stationary Recreation	Capital construction encroachment, violation of water protection zones	Concentration of infrastructure at the NNPs periphery; prohibition of construction closer than 100 m from riverbeds; implementation of eco-architecture
Economic (Utility) Zone	Intensive logging, overgrazing on mountain pastures (*polonynas*), soil degradation	Implementation of strict limits on livestock grazing (pasture rotation maps); transition to selective (close-to-nature) silvicultural systems

Implementation of innovative GIS technologies and remote monitoring systems

Effective spatial optimization and systematic control over compliance with the sozological regime are impossible without the integration of modern tools of Geographic Information Systems (GIS) and Remote Sensing (RS) technologies. The transition to a digital management paradigm for protected areas allows for minimizing the influence of subjective factors while ensuring high accuracy and objectivity in environmental auditing[37].

The use of high-spatial-resolution satellite data, radar scanning materials, and unmanned aerial vehicles (UAVs) enables national nature park administrations to regularly record spatio-temporal transformations of the landscape cover. Specifically, this is critically important for detecting hidden pockets of illegal logging in hard-to-reach mountain valleys and ravines, as well as for monitoring desuccesion processes and shrub expansion on high-altitude pastures (polonynas) resulting from traditional transhumance livestock farming.

The integration of multispectral satellite imagery and the calculation of vegetation indices (in particular, NDVI) allow for rapid, automated analysis of

[37] Проценко В. В. Використання ГІС-технологій у просторовому плануванні та моніторингу територій природно-заповідного фонду. *Екологічні науки*. 2019. № 2(25). С. 88–94.

defoliation and dieback in Norway spruce stands caused by climatic anomalies and pest outbreaks. Furthermore, the development of interactive Web-GIS geoportals based on cloud technologies ensures transparency in environmental protection activities, enables public involvement in monitoring violations, and serves as a tool for automated risk modeling of linear erosion or fire hazards. Concurrently, the implementation of mobile GIS applications for field ranger surveys-combined with automated pattern recognition algorithms-makes it possible to form an integrated spatial decision support system and transition from passive violation tracking to proactive geoecological management.

Key directions for applying GIS technologies and Remote Sensing (RS) methods in the geoecological monitoring of mountain landscapes are systematized in Table 7.

Table 7

Application of Remote Sensing and GIS technologies for spatial monitoring of NNPs

Tool / Technology	Object of Ecological Monitoring	Expected Outcome of Spatial Management
Multispectral satellite imagery (Sentinel, Landsat)	Forest massifs, condition of *polonyna* vegetation cover	Detection of illegal clear-cutting, assessment of coniferous forest dieback scale, monitoring of pasture digression
UAVs (drones) with thermal imagers	Wildlife, hiking routes, fire hotspots	Wildlife population census without disturbance factors, control over illegal campfires, detection of poachers
Airborne Laser Scanning (LiDAR)	Topography, vertical forest structure, watercourses	Precise mapping of erosion processes and landslides, flood zone modeling during inundations, designing eco-trails
GIS modeling of migration corridors	Migration routes of large carnivores and ungulates	Designing transboundary ecological corridors (e.g., for brown bear or lynx), planning buffer zones

Any measures aimed at modifying functional zoning and strengthening the sozological regime inevitably face resistance from local territorial communities. The population of mountain settlements in the Carpathian region has historically depended on logging, non-timber forest use (harvesting wild berries, mushrooms, and medicinal raw materials), and high-altitude pasture livestock farming. For this reason, the spatial optimization of NNPs must necessarily incorporate effective mechanisms for compensating socio-economic losses and creating alternative sources of self-employment[38].

[38] Смалійчук А. Д., Мельник А. В. Соціально-економічні аспекти функціонування природно-заповідних територій в умовах децентралізації. *Часопис соціально-економічної географії*. 2022. Вип. 32. С. 45–56.

A conceptual solution to this problem lies in establishing special buffer «collaboration zones» (partnership zoning) at the boundary between protected sites and the lands of local communities. Within these areas, priority should be given to the development of sustainable nature management models: certified harvesting of non-timber forest products, the development of ecological and green rural tourism, and the revival of traditional handicrafts and high-altitude pasture cheese-making. The national park should function not as an institutional barrier or an exclusion zone for the local population, but as a powerful economic catalyst that generates value added for the area by leveraging its ecological brand[39].

A promising instrument for harmonizing these relationships is the implementation of Payment for Ecosystem Services (PES) mechanisms, under which communities receive financial compensation for preserving the water protection, habitat-forming, and recreational functions of mountain landscapes. This can be achieved through the partial redistribution of environmental taxes and recreational fees directly to local budgets, fostering a direct economic interest among residents to observe the protected area regulations. The institutional foundation for such interaction should be a transition toward participatory management (co-management) models through the creation of effective public-scientific advisory councils involving local self-government bodies and land users. The implementation of regional eco-labeling and local branding for craft products (in particular, traditional Carpathian cheeses) will further capitalize on the conservation status of the area and increase the profitability of local households. Ultimately, this compromise approach allows for mitigating socio-ecological conflicts, transforming local communities from potential opponents into active partners in preserving landscape diversity.

The mechanisms of socio-economic integration of NNPs, loss compensation tools, and the expected geoecological and social effects are detailed in Table 8.

Comprehensive and consistent implementation of the proposed scientific and practical measures opens up opportunities for a fundamental harmonization of the spatial-functional structure of national nature parks in the Ukrainian Carpathians. Moving away from the outdated static model of administrative zoning in favor of a dynamic landscape-ecological approach makes it possible to form a coherent and representative ecological network (ecological framework) for the area. This will ensure the necessary balance between the strict conservation of the most vulnerable high-altitude and forest geosystems and the controlled development of non-exhaustive forms of land use in peripheral zones.

[39] Ковальчук А. А. Механізми вирішення конфліктів між місцевими громадами та адміністраціями національних парків. *Регіональна економіка*. 2020. № 4. С. 77–85.

Table 8

Mechanisms for resolving spatial socio-economic conflicts within NNPs

Type of Conflict with Community	Restriction Introduced by Park	Compensation Mechanism or Alternative for Community
Logging / Forestry	Prohibition of sanitary and clear-cutting in new strictly protected zones	Creation of jobs in forest protection and recreation; preferential fuel wood supply for local residents (from sanitary cuttings in the economic zone)
Agropastoral (Grazing)	Livestock head limits on degraded high-altitude pastures (*polonynas*)	Support for establishing farming cooperatives; grants for developing high-altitude cheese dairies as gastrotourism sites
Recreational	Ban on off-roading (jeeping) and quad bike (ATV) use	Training and employment of local residents as tour guides; development of horseback riding and cycling tourism

The systemic transition from extensive resource use models to high-tech geospatial planning based on GIS tools and Remote Sensing (RS) data fundamentally changes the quality of conservation management. The application of modern spatial data analysis algorithms, satellite monitoring, and spatio-temporal modeling enables a transformation of NNPs operations from passive recording of violations into a system of proactive response, rapid environmental risk assessment, and adaptive landscape management.

At the same time, a key guarantee for the long-term sustainability of an optimized spatial structure is the involvement of local territorial communities in decision-making processes through participatory management tools. The practical integration of effective economic mechanisms – in particular Payments for Ecosystem Services (PES), compensation instruments, support for sustainable high-altitude pasture livestock farming, and local eco-branding– transforms the local population from potential opponents of conservation initiatives into active stakeholders in environmental preservation. Such synergy establishes a solid social foundation for the long-term conservation of the unique landscape, phytocoenotic, and biological diversity of the Carpathian region[40, 41].

CONCLUSIONS

A comprehensive analysis of nature management within the NNPs of the Ukrainian Carpathians demonstrates the existence of deep-seated contradictions between conservation objectives and the socio-economic interests of local

[40] Ковальчук А. А. Механізми вирішення конфліктів між місцевими громадами та адміністраціями національних парків. *Регіональна економіка*. 2020. № 4. С. 77–85.

[41] Попович С. Ю. Інтеграція природно-заповідного фонду України до загальноєвропейської екологічної мережі. *Екологія та ноосферологія*. 2021. Т. 32, № 1. С. 12–23.

communities. The natural-territorial complexes of the mountain region experience intense pressure resulting from unsustainable forestry practices, the large-scale construction of small diversion hydropower plants, and the rapid commercialization of recreational activities. Unregulated mass tourism, the proliferation of motorized transport on high-altitude slopes, and overgrazing on mountain pastures trigger pastoral and recreational digression, exacerbate erosion processes, and lead to biodiversity loss.

To resolve existing resource use conflicts, a scientifically grounded reorganization of the spatial structure of NNPs is critically required, shifting from an outdated administrative zoning model toward a dynamic landscape-ecological approach. The primary step must be the expansion of the core reserve zone, with the mandatory inclusion of identified primeval forests, old-growth forests, and first-order drainage basins, alongside the formation of effective buffer zones and local ecological corridors.

Ensuring effective conservation management and systematic control over compliance with the protection regime is impossible without the digitalization of governance. The implementation of GIS technologies and Remote Sensing (RS) methods, along with the development of interactive Web-GIS geoportals, will enable a transition from passive recording of environmental violations to adaptive landscape management.

At the same time, a key condition for the long-term sustainability of the optimized NNP network is the socio-economic integration of protected areas. Involving the local population in decision-making processes through participatory management models and establishing financial incentive mechanisms will transform local communities into active partners in environmental preservation. Comprehensive implementation of these principles will ensure the conservation of the unique landscape heritage of the Carpathians and lay a reliable foundation for the sustainable development of the region.

SUMMARY

This paper investigates the spatial and ecological-economic aspects of nature management within national nature parks (NNPs) of the Ukrainian Carpathians in the context of ensuring their sustainable development. It is revealed that mountain landscape ecosystems experience intense anthropogenic pressure caused by unsustainable forestry practices, hydropower development on rivers, pastoral digression, and unmanaged recreational activities (specifically mass hiking and extreme motorized tourism). These factors induce systemic degradation of the soil-vegetation cover, disruption of the hydrological regime, and the exacerbation of spatial-resource conflicts. To optimize NNP functionality, the necessity of transitioning from traditional administrative to

landscape-ecological zoning – with a substantial expansion of core reserve zones at the expense of primeval forests and watersheds-is substantiated. It is proven that effective geoecological monitoring requires the mandatory integration of modern GIS technologies and Remote Sensing (RS) tools. Mechanisms for resolving conflicts with local communities are proposed through the introduction of participatory management, Payments for Ecosystem Services (PES), and the development of sustainable business models. Implementation of the proposed measures will harmonize conservation and economic interests, transforming the local population into active stakeholders in biodiversity preservation.

Bibliography

1. Брусак Е. І. Функціональне зонування гірських природоохоронних територій: проблеми та шляхи вирішення. *Вісник Львівського університету. Серія географічна*. 2021. Вип. 55. С. 34–45.
2. Волощук М. Д. Ерозійні процеси в Українських Карпатах та вплив рекреаційної діяльності на їх активізацію. Ужгород : Карпати, 2015. 190 с.
3. Гетьман В. І. Еколого-географічні основи територіальної організації національних природних парків України. Київ : Інститут географії НАН України, 2018. 245 с.
4. Голубець М. А. Екосистемологія. Львів : Поліграфцентр, 2000. 316 с.
5. Жук П. В., Кравців В. С. Рекреаційний потенціал Українських Карпат і перспективи його використання. *Українські Карпати: проблеми і перспективи* : матер. Міжнародн. наук.-практ. конф. Львів, 1993. С. 58.
6. Заповідні екосистеми Карпат / С. М. Стойко та ін. Львів : Світ, 1991. 248 с.
7. Заповідники і національні природні парки України. Київ : Вища школа, 1999. 232 с.
8. Кияк В. Г. Дигресія високогірних екосистем Українських Карпат під впливом пасовищного навантаження. *Екологія та ноосферологія*. 2017. Т. 28, № 1–2. С. 45–54.
9. Коваль Я. В., Антоненко І. Я. Значення гірських лісів у системі екологічної безпеки. *Гори і люди (у контексті сталого розвитку)* : матер. Міжнар. наук.-практ. конф. Ужгород : Патент, 2002. Т. ІІ. С. 381–385.
10. Ковальчук А. А. Екологічні проблеми розвитку малої гідроенергетики в Українських Карпатах. *Гідрологія, гідрохімія і гідроекологія*. 2018. № 2(49). С. 56–65.
11. Ковальчук А. А. Механізми вирішення конфліктів між місцевими громадами та адміністраціями національних парків. *Регіональна економіка*. 2020. № 4. С. 77–85.

12. Круглов І. С. Трансформація ландшафтів Українських Карпат. *Український географічний журнал*. 2018. № 3. С. 14–22.

13. Кукурудза М. М. Менеджмент національних парків : навчальний посібник. Львів : ЛНУ ім. Івана Франка, 2003. 127 с.

14. Мельник А. В. Українські Карпати: еколого-ландшафтознавче дослідження. Львів, 1999. 288 с.

15. Мельник А. В. Функціональне зонування національних природних парків як інструмент збалансованого просторового розвитку. *Вісник Львівського університету. Серія географічна*. 2020. Вип. 54. С. 112–123.

16. Олійник В. С. Гідрологічна роль лісів Українських Карпат. Івано-Франківськ : НАІР, 2013. 232 с.

17. Олійник В. С. Паводкорегулююча роль гірських лісів Карпат. *Екологічні та соціально-економічні аспекти катастрофічних стихійних явищ у Карпатському регіоні (повені, селі, зсуви)* : матер. Міжнар. наук.-практ. конф. Рахів, 1999. С. 257–260.

18. Попович С. Ю. Інтеграція природно-заповідного фонду України до загальноєвропейської екологічної мережі. *Екологія та ноосферологія*. 2021. Т. 32, № 1. С. 12–23.

19. Про екологічну мережу України : Закон України. *Відомості Верховної Ради України*. 2004. № 45. Ст. 502.

20. Про Загальнодержавну програму формування національної екологічної мережі України на 2000–2015 роки : Закон України. *Відомості Верховної Ради України*. 2000. № 47. С. 40.

21. Про природно-заповідний фонд України : Закон України. *Відомості Верховної Ради України*. 1992. № 34. Ст. 502.

22. Проценко В. В. Використання ГІС-технологій у просторовому плануванні та моніторингу територій природно-заповідного фонду. *Екологічні науки*. 2019. № 2(25). С. 88–94.

23. Рожко І. М. Рекреаційна оцінка гірських природно-територіальних комплексів для потреб туризму (на прикладі Українських Карпат) : автореф. дис. … канд. геогр. наук : 11.00.11. Львів, 2000. 175 с.

24. Романів А. С., Романів О. Я. Обґрунтування мережі туристичних маршрутів Національного природного парку «Синевир» на засадах ландшафтознавчих досліджень. *Фізична географія та геоморфологія*. 2004. Вип. 46. Т. 1. С. 243–250.

25. Смалійчук А. Д. Рекреаційна трансформація ландшафтів Чорногірського масиву: сучасний стан та шляхи оптимізації. *Фізична географія та геоморфологія*. 2019. Вип. 1(93). С. 78–86.

26. Смалійчук А. Д., Мельник А. В. Соціально-економічні аспекти функціонування природно-заповідних територій в умовах децентралізації. *Часопис соціально-економічної географії*. 2022. Вип. 32. С. 45–56.

27. Снігурець О. В. Вплив гідротехнічних споруд на іхтіофауну гірських річок. *Біологічні студії*. 2019. Т. 13, № 1. С. 95–104.

28. Стойко С. М. Охорона природи Українських Карпат та прилеглих територій. Київ : Наукова думка, 1980. 261 с.

29. Чернявський М. В. Проблеми збереження старовікових лісів та пралісів Українських Карпат. *Науковий вісник НЛТУ України*. 2016. Вип. 26.4. С. 120–128.

Information about the authors:

Basiuk Tetiana,
Candidate of Geographic Sciences, Associate Professor,
Associate Professor at the Department of Geology and Hydrology
National University of Water and Environmental Engineering
11, Soborna Street, Rivne, Ukraine

Romaniv Andriy,
Candidate of Geographic Sciences, Associate Professor,
Associate Professor at the Department of Geography and Tourism
Academician Stepan Demianchuk International
University of Economics and Humanities
4, Stepan Demianchuk Street, Rivne, Ukraine

CHAPTER 29

ПОЛІТИКО-ГЕОГРАФІЧНІ ВИМІРИ СТАЛОГО РОЗВИТКУ НОРВЕГІЇ В УМОВАХ ТРАНСФОРМАЦІЇ РЕСУРСНОЇ ТА ЕКОЛОГІЧНОЇ ПОЛІТИКИ

Браславська Оксана
DOI https://doi.org/10.30525/978-9934-26-714-7-29

ВСТУП

Політична географія сталого розвитку останніми роками набуває нового змісту: питання територіальної організації влади, ресурсного менеджменту та екологічного регулювання дедалі частіше розглядаються не як окремі предметні площини, а як взаємопов'язані виміри одного процесу – просторової трансформації національних господарських систем в умовах кліматичних викликів. У цьому контексті Норвегія становить особливий дослідницький випадок: країна, чия економіка історично побудована на експорті вуглеводнів континентального шельфу, водночас позиціонує себе як один зі світових лідерів кліматичної політики, декарбонізованої електроенергетики та інституційної дисципліни у поводженні з ресурсною рентою.

Актуальність звернення до норвезького досвіду для вітчизняної суспільної географії та регіоналістики зумовлена кількома обставинами. По-перше, Норвегія демонструє модель поєднання ресурсної економіки з довгостроковим стратегічним плануванням, яка становить теоретичний і практичний інтерес для країн із подібною структурою експорту. По-друге, досвід норвезької децентралізації – розподілу повноважень між державою, фюльке (округами) та комунами у сфері землекористування й видачі дозволів на розміщення об'єктів відновлюваної енергетики – є показовим для країн, що проводять власні реформи територіальної організації влади. По-третє, загострення територіальних конфліктів довкола розміщення вітроелектростанцій на землях традиційного природокористування саамського населення актуалізує ширшу дискусію про соціальну легітимність «зеленого переходу» та межі компромісу між кліматичними цілями і правами територіальних спільнот.

Метою розділу є розкриття політико-географічних вимірів сталого розвитку Норвегії – територіально-адміністративного,

ресурсно-економічного, еколого-регуляторного та конфліктно-просторового – у їх взаємній зумовленості. Досягнення мети передбачає розв'язання таких завдань: охарактеризувати географічне положення та інституційні засади норвезької моделі управління сталим розвитком; простежити трансформацію ресурсної та енергетичної політики країни; проаналізувати інструменти кліматичного регулювання та їх результативність; розкрити природу територіальних конфліктів, пов'язаних із розширенням вітроенергетики, на прикладі вітропарку Фосен.

У теоретико-методологічному відношенні розділ спирається на розуміння сталого розвитку території як складної взаємодії трьох підсистем: економічної, екологічної та соціально-інституційної, збалансованість яких визначається якістю державного управління природокористуванням на різних просторових рівнях: державному, регіональному та місцевому. Порівняльний аналіз європейських моделей сталого розвитку показує, що результативність національної екологічної політики значною мірою залежить не лише від вибраного набору фіскальних та регуляторних інструментів, а й від того, наскільки послідовно ці інструменти узгоджуються з особливостями територіальної організації влади, структурою природно-ресурсного потенціалу та історично сформованими практиками землекористування конкретної країни. Норвезький випадок є показовим саме тому, що дає змогу простежити всі три складники сталого розвитку в їх конкретно-територіальному вияві – від континентального шельфу до окремого оленярського дистрикту.

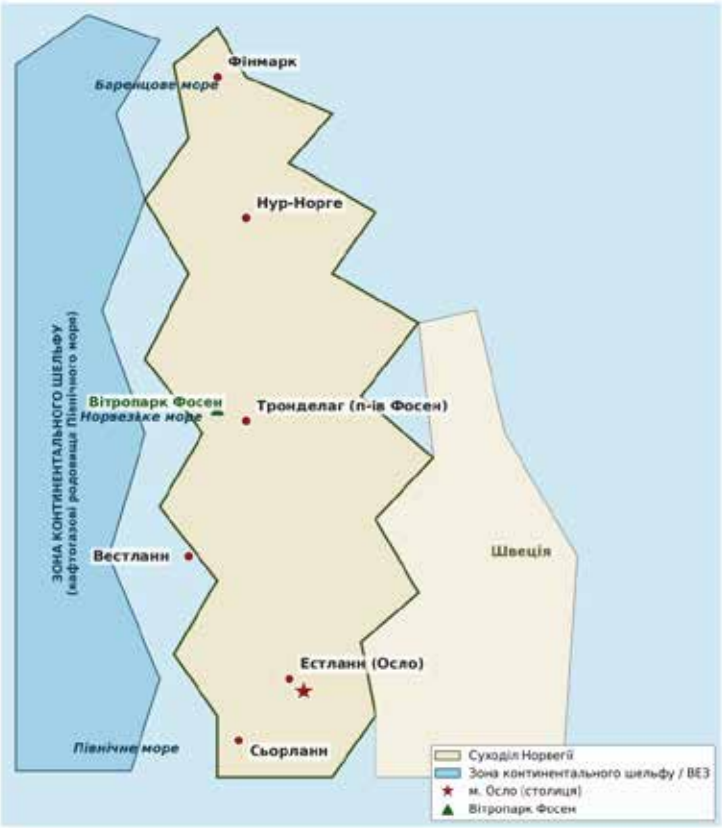
Структура розділу охоплює два взаємопов'язані підрозділи, кожен з яких розкриває окремий вимір досліджуваної проблеми, доповнені трьома аналітичними таблицями та двома картосхемами, які унаочнюють просторові й статистичні аспекти сталого розвитку Норвегії.

1. Географічні, інституційні та ресурсно-економічні виміри сталого розвитку Норвегії

Норвегія розташована в західній частині Скандинавського півострова та простягається у меридіональному напрямку майже на 2 500 км – від протоки Скагеррак на півдні до мису Нордкін за Полярним колом на півночі. Така витягнута конфігурація території, порізана тисячами фіордів, зумовлює винятково довгу берегову лінію (понад 25 тис км з урахуванням островів та фіордів) і формує специфічний тип економіко-географічного положення: приморського, ресурсно орієнтованого, з обмеженою часткою придатних для сільського господарства земель і водночас значним гідроенергетичним та морегосподарським потенціалом.

Ключовим складником політико-географічного положення Норвегії є її морські простори. Виключна економічна зона країни охоплює акваторії трьох

морів – Північного, Норвезького та Баренцового, – кожне з яких має власний режим прикордонного розмежування та ресурсного освоєння. Розмежування континентального шельфу в Північному морі з Данією та Великою Британією було здійснено ще у 1960–1970-х роках, тоді як делімітація морського кордону з Росією в Баренцовому морі – площею близько 175 тис км² спірної акваторії – була завершена лише договором 2010 р., що відкрило додаткові площі для геологорозвідки та рибальства в приполярних широтах. Просторову структуру цих зон унаочнено на картосхемі 1.



Картосхема 1. Економіко- та політико-географічне положення Норвегії у межах континентального шельфу Північно-Східної Атлантики

Умовна картосхема, не для навігаційного використання. Складено автором на основі [7; 8]

Політико-адміністративна організація Норвегії відображає загальноскандинавську модель децентралізованого унітаризму. У результаті реформи 2020 р. кількість фюльке (регіональних одиниць) було скорочено з дев'ятнадцяти до одинадцяти, а базовою ланкою місцевого самоврядування залишаються комуни (муніципалітети), яких налічується близько 356. Саме на муніципальному рівні здебільшого приймаються рішення щодо територіального планування, тоді як видача концесій на будівництво великих енергетичних об'єктів – гідро- та вітроелектростанцій, ліній електропередач – перебуває у компетенції Норвезького управління водних ресурсів та енергетики (NVE), підпорядкованого Міністерству нафти й енергетики. Така багаторівнева система розподілу повноважень є типовим прикладом того, що у вітчизняній суспільній географії визначається як інституційний вимір сталого розвитку територій, де ефективність екологічної політики залежить від злагодженості дій центральних, регіональних органів влади та місцевих громад[1].

Попри те що Норвегія не є членом Європейського Союзу, вона входить до Європейського економічного простору та Європейської асоціації вільної торгівлі, що зобов'язує країну імплементувати значну частину екологічного законодавства ЄС, а в окремих напрямах установлювати навіть суворіші за загальноєвропейські стандарти[2]. Інституційним ядром кліматичної політики є ухвалений парламентом (Стортингом) Закон про клімат, яким законодавчо закріплено ціль досягнення кліматичної нейтральності до 2030 р. та довгострокову ціль скорочення викидів парникових газів на 90–95% до 2050 р. порівняно з рівнем 1990 р. Показово, що норвезька модель поєднує риси «державницького» підходу – значну роль центральних органів влади у стратегічному плануванні ресурсної політики – з елементами територіальної демократії, коли оленярські дистрикти (сійди) саамського населення визнаються повноцінними суб'єктами права на традиційне землекористування, здатними оскаржувати рішення державних органів у судовому порядку, про що детальніше йтиметься у другому підрозділі.

Окремою складовою частиною інституційної архітектури є Саметінг – виборний представницький орган саамського населення, заснований у 1989 р., що має дорадчі повноваження у питаннях, які зачіпають традиційні території проживання й господарювання саамів, однак не має права вето щодо рішень центральних органів влади про видачу

[1] Буканов Г. М. Концепція сталого розвитку як основа формування державної екологічної політики на державному та регіональному рівнях. *Вчені записки Таврійського національного університету імені В. І. Вернадського. Серія «Публічне управління та адміністрування».* 2020. Т. 31(70). № 3.

[2] OECD. OECD Environmental Performance Reviews: Norway 2022. Paris : OECD Publishing, 2022. DOI: 10.1787/59e71c13-en

енергетичних концесій. Ця інституційна асиметрія – між консультативним статусом Саметінгу та обов'язковими до виконання рішеннями NVE і Міністерства нафти й енергетики – є однією зі структурних передумов територіальних конфліктів, що аналізуються у другому підрозділі. Водночас муніципалітети, на території яких планується розміщення енергетичних об'єктів, формально залучаються до процедури погодження, однак остаточне рішення щодо видачі концесії залишається за центральним органом виконавчої влади, що обмежує реальний вплив місцевого самоврядування на розміщення великих інфраструктурних об'єктів.

Порівняльний аналіз європейських моделей сталого розвитку показує, що інституційна конфігурація має вирішальне значення для результативності екологічної політики: країни зі стійкими традиціями місцевого самоврядування та прозорими процедурами узгодження інтересів демонструють вищу соціальну легітимність кліматичних рішень[3]. Норвезький випадок є показовим саме тому, що поєднує сильну державу – власника ресурсної ренти – з розвиненою системою територіального самоврядування, що створює як можливості для збалансованого управління, так і додаткові точки потенційного конфлікту між рівнями влади.

Сучасна ресурсна модель Норвегії сформувалася порівняно пізно: до відкриття у 1969 р. нафтового родовища Екофіск у норвезькому секторі Північного моря країна залишалася переважно аграрно-рибальською економікою з розвиненим гідроенергетичним і суднобудівним секторами. Стрімке нарощування видобутку впродовж 1970–1990-х років супроводжувалося формуванням особливої моделі державного контролю над ресурсною галуззю – через державну компанію Statoil (нині Equinor, у якій держава зберігає 67% акцій) та систему прямої фінансової участі держави (State's Direct Financial Interest), що дало змогу зосередити значну частину ресурсної ренти в руках держави, а не приватних чи іноземних операторів[4]. Саме ця історична траєкторія «одержавленого» освоєння шельфу заклала інституційні передумови для подальшого спрямування нафтогазових надходжень до суверенного фонду добробуту, а не на поточне бюджетне споживання, що принципово відрізняє норвезьку модель від траєкторій розвитку більшості інших країн – експортерів вуглеводнів.

Норвегія є найбільшим виробником нафти і природного газу в Західній Європі та з 2022 р. найбільшим постачальником природного газу до Європейського Союзу, що набуло особливого геополітичного значення на

[3] Попович Н. В. Стратегії сталого розвитку країн Європи та їх особливості. *Проблеми безперервної географічної освіти і картографії*. 2015. Вип. 22. С. 115–118.

[4] Austvik O. G. Norway in the Geopolitics of Energy. *Energy Policy*. 2025. Vol. 198. Article 114410. DOI: 10.1016/j.enpol.2024.114410

тлі скорочення поставок російських енергоносіїв на європейський ринок. У 2024 р. видобуток нафти і газу на норвезькому континентальному шельфі досяг рекордного рівня – 241,2 млн станд. м³ нафтового еквівалента, зокрема рекордного обсягу видобутку природного газу. Нафтогазовий сектор забезпечує близько 22% валового внутрішнього продукту країни, 48% загального обсягу експорту та 32% доходів державного бюджету. Ці показники засвідчують, що, попри кліматичну риторику, ресурсна економіка залишається структуроутворювальним чинником норвезької держави.

Водночас саме завдяки контрольованому освоєнню шельфових родовищ Норвегія сформувала унікальний інститут міжпоколіннєвого перерозподілу ресурсної ренти – Державний пенсійний фонд «Глобал» (Нафтовий фонд), активи якого перевищують 1,7 трлн дол. США, що робить його найбільшим суверенним фондом добробуту у світі. Бюджетне («фіскальне») правило обмежує щорічні видатки з фонду приблизно 3% його вартості – очікуваною реальною дохідністю портфеля, – що дає змогу вилучити поточні бюджетні видатки з прямої залежності від коливань цін на нафту та зберегти частину ресурсної ренти для майбутніх поколінь. У науковій літературі цю модель нерідко розглядають як приклад успішного уникнення «ресурсного прокляття» завдяки поєднанню фіскальної дисципліни, прозорості врядування та довгострокового стратегічного планування[5].

Парадоксальною рисою норвезької енергетичної системи є глибокий розрив між структурою внутрішнього енергоспоживання та структурою експорту. Практично вся електроенергія, що споживається в країні, виробляється з відновлюваних джерел: частка гідроенергетики в електрогенерації становить 88–92%, а сукупна частка відновлюваних джерел (гідро-, вітро- та незначною мірою біопаливної генерації) сягає 96–98%. Натомість переважна більшість видобутих вуглеводнів експортується та спалюється за межами країни, унаслідок чого пов’язані з ними викиди не враховуються у національному кадастрі парникових газів згідно з територіальним принципом обліку МГЕЗК. Цю розбіжність між «декарбонізованим удома» енергобалансом і фактичною роллю глобального постачальника викопного палива дослідники визначають як дискурсивну рамку «нафтодержави низьковуглецевого переходу» (petrostate's low-carbon transition), у якій кліматичне лідерство та продовження нафтовидобутку легітимізуються одночасно як взаємодоповнювальні, а не суперечливі стратегії[6].

---

[5] Національний інститут стратегічних досліджень. Державна політика сталого розвитку на засадах «зеленої економіки» : аналітична записка. Київ : НІСД, 2013.

[6] Bang G., Lahn B. A Petrostate’s Outlook on Low-Carbon Transitions: The Discursive Frames of Petroleum Policy in Norway. *Energies*. 2021. Vol. 14. No. 17. Article 5411. DOI: 10.3390/en14175411

Таблиця 1

Основні структурні показники ресурсно-економічного розвитку Норвегії

Показник	Значення	Рік
Площа території	323 800 км²	–
Довжина берегової лінії (з фіордами)	понад 25 000 км	–
Морські зони (ВЕЗ) у трьох морях	Північне, Норвезьке, Баренцове моря	–
ВВП на душу населення	≈ 96,6 тис дол. США	2024
Частка нафтогазового сектору у ВВП	≈ 22%	2024
Частка нафтогазового сектору в експорті	≈ 48%	2024
Частка нафтогазових надходжень у доходах бюджету	≈ 32%	2024
Частка гідроенергетики в електрогенерації	≈ 88–92%	2024
Частка відновлюваних джерел в електрогенерації	≈ 96–98%	2024
Обсяг Державного пенсійного фонду («Нафтового фонду»)	понад 1,7 трлн дол. США	2024
Ціль кліматичної нейтральності	2030 р.	–

Складено автором на основі даних, наведених у тексті розділу

Геополітичний вимір ресурсної політики Норвегії посилюється її роллю в енергетичній безпеці Європи: розгалужена мережа підводних газопроводів та електричних кабелів з'єднує норвезький шельф і гідроенергетичну систему з континентальною Європою та Великою Британією, перетворюючи країну на один із ключових вузлів енергопостачання регіону. Після різкого скорочення поставок трубопровідного газу з Росії у 2022 р. саме норвезька експортна інфраструктура – газопроводи Europipe, Langeled та інші магістралі, що з'єднують родовища Північного моря з терміналами у Великій Британії, Німеччині, Бельгії та Франції, – прийняла на себе основне навантаження з диверсифікації європейського газопостачання, що суттєво посилило стратегічну вагу країни в енергетичній архітектурі континенту. Ця обставина породжує додатковий політичний тиск на норвезький уряд щодо збереження чи навіть нарощування обсягів видобутку в короткостроковій перспективі, що прямо суперечить довгостроковим кліматичним зобов'язанням країни й ілюструє характерну для «дискурсивних рамок» нафтової політики Норвегії практику одночасного обстоювання ролі надійного постачальника викопного палива для союзників і статусу кліматичного лідера. Розширення видобутку на нових ділянках континентального шельфу, зокрема у Баренцовому морі, після завершення делімітаційної угоди 2010 р., лише посилює цю

структурну напругу між короткостроковими інтересами енергетичної безпеки Європи та довгостроковими цілями декарбонізації.

2. Екологічна політика, територіальні конфлікти та перспективи сталого розвитку Норвегії

Основним інструментом кліматичного регулювання в Норвегії є податок на викиди діоксиду вуглецю, запроваджений ще у 1991 р. – один із перших у світі. Відповідно до Плану кліматичних дій на 2021–2030 рр., ставку податку заплановано підвищити з 590 норвезьких крон (близько 69 дол. США) за тонну CO_2-екв. у 2021 р. до 2 000 крон (близько 233 дол. США) до 2030 р. Номінальна ставка вуглецевого податку в Норвегії є однією з найвищих у Європі та охоплює понад 80% національних викидів парникових газів. Паралельно країна бере участь у системі торгівлі квотами на викиди Європейського Союзу (EU ETS) з 2008 р., що забезпечує подвійний контур цінового сигналу для найбільших промислових емітентів.

У 2022 р. Норвегія додатково запровадила податок на викиди від спалювання відходів і скасувала пільгу для використання природного газу та скрапленого нафтового газу в тепличному господарстві, що засвідчує послідовне розширення бази оподаткування викидів. Водночас частка «зелених» податків у структурі податкових надходжень має тенденцію до зниження – насамперед через масштабні податкові стимули для електромобілів, які скорочують надходження від традиційних транспортних податків. Ця обставина ілюструє системне протиріччя екологічної фіскальної політики: успішність одного інструменту стимулювання (пільги для електромобілів) послаблює фіскальну базу іншого (податки на викиди від транспорту).

Таблиця 2

Динаміка ставки податку на викиди CO_2 у Норвегії, 2021–2030 рр.

Показник податку на викиди CO_2	2021 р.	Ціль на 2030 р.
Ставка, норвезькі крони за тонну CO_2-екв.	590 NOK	2 000 NOK
Ставка у доларовому еквіваленті	≈ 69 дол. США	≈ 233 дол. США
Частка викидів, охоплених податком	понад 80% національних викидів	збереження/ розширення охоплення
Участь у системі торгівлі квотами ЄС (EU ETS)	з 2008 р.	триває
Частка викопного палива у державній підтримці (від податкових надходжень)	≈ 0,2%	тенденція до зниження

Складено автором на основі даних, наведених у тексті розділу

Комплексна оцінка екологічної результативності Норвегії, здійснена ОЕСР у 2022 р. (четвертий за рахунком огляд із 2011 р.), констатує, що країна є «піонером» у багатьох напрямах природоохоронної політики та інвестує значні кошти в технологічний розвиток «зеленого» переходу. Разом із тим огляд містить 30 рекомендацій щодо подальшого вдосконалення екологічної політики, з особливим наголосом на сталому землекористуванні та збереженні біорізноманіття, а також на низькій продуктивності використання матеріальних ресурсів і високому матеріальному сліді на душу населення. Це свідчить, що навіть за високих показників декарбонізації енергетичного сектору залишаються неврегульованими проблеми ресурсоефективності та впливу на екосистеми суходолу.

У порівняльній європейській перспективі норвезький досвід вуглецевого оподаткування та розширення частки відновлюваної енергетики часто розглядається як референтна модель для оцінювання ефективності механізмів екологічної політики інших країн[7]. Зіставлення ключових показників екологічної політики кількох європейських країн і України (табл. 3) підтверджує, що за часткою відновлюваної електрогенерації та тривалістю застосування вуглецевого оподаткування Норвегія та Швеція суттєво випереджають більшість інших держав регіону, тоді як в Україні відповідні інструменти запроваджено з істотним відставанням за ставками та охопленням.

Таблиця 3

Порівняння окремих показників екологічної політики Норвегії з іншими європейськими країнами та Україною

Країна	Частка ВДЕ в електрогенерації	Наявність прямого вуглецевого податку
Норвегія	≈ 96–98%	так, із 1991 р., охоплює понад 80% викидів
Швеція	≈ 65–70% (переважно гідро- й атомна генерація)	так, із 1991 р., одна з найвищих ставок у світі
Данія	≈ 80% (переважно вітроенергетика)	так, із 1992 р.
Німеччина	≈ 55–60%	непряма ціна через EU ETS, національний податок із 2021 р.
Україна	≈ 10–12% (без урахування великої гідро- та атомної генерації)	формально запроваджено, ставка суттєво нижча за середньоєвропейську

Складено автором на основі даних, наведених у тексті розділу

[7] Башинська Ю. І. Екологічна політика в країнах світу в умовах розвитку екологічно свідомого суспільства. *Соціально-економічні проблеми сучасного періоду України*. 2021. Вип. 4. С. 22–27.

Водночас дослідники наголошують, що успіх норвезької моделі значною мірою зумовлений специфічними структурними чинниками: наявністю значного гідроенергетичного потенціалу, обмеженою чисельністю населення та фіскальною подушкою ресурсної ренти, які істотно ускладнюють пряме перенесення цього досвіду на країни з іншою структурою енергобалансу. У цьому сенсі оцінка готовності країн світу до низьковуглецевого майбутнього, що враховує не лише поточну структуру генерації, а й обсяги «зелених» інвестицій та інституційну спроможність держави реалізовувати довгострокові стратегії, послідовно відносить Норвегію до групи найбільш підготовлених економік[8]. Це підкреслює, що показники табл. 3 слід інтерпретувати не як самостійні індикатори успіху, а як похідні від ширшого комплексу інституційних та ресурсних передумов, притаманних кожній конкретній країні.

Поряд із фіскальними та регуляторними інструментами кліматичної політики дедалі більшого значення набуває територіальний вимір її реалізації, зокрема конфлікти, що виникають довкола розміщення об'єктів відновлюваної енергетики.

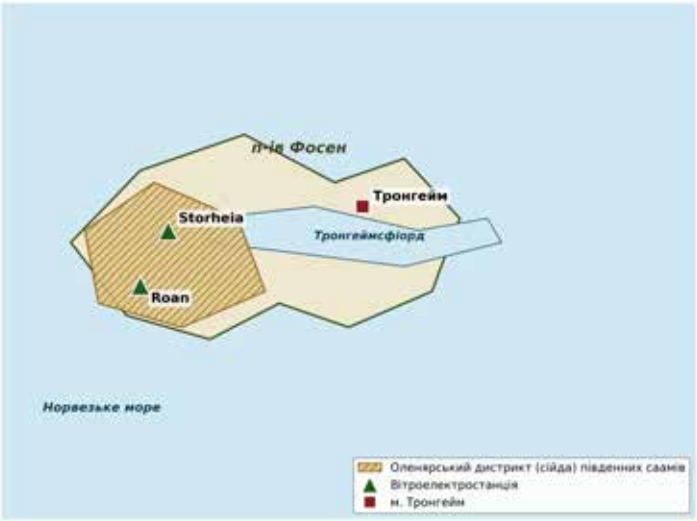
Розширення наземної вітроенергетики, яке в Норвегії розглядається як складник стратегії декарбонізації та диверсифікації енергобалансу, дедалі частіше входить у суперечність із традиційним природокористуванням корінного саамського населення. У науковій літературі це явище дедалі частіше концептуалізують через поняття «зеленого» колоніалізму – ситуації, коли реалізація кліматично мотивованих інфраструктурних проєктів відтворює історичні моделі витіснення корінних народів з їхніх традиційних територій, цього разу під егідою боротьби зі зміною клімату[9].

Найбільш показовим у цьому контексті є конфлікт довкола вітропарку Фосен на однойменному півострові у Центральній Норвегії – найбільшого наземного вітропарку Європи. Концесії на будівництво вітроелектростанцій Storheia та Roan були надані Норвезьким управлінням водних ресурсів та енергетики ще в 2010 та 2013 рр., попри заперечення оленярських господарств південних саамів, для яких ця територія є зимовим пасовищем. Попри судові оскарження з боку постраждалих оленярських дистриктів, будівництво продовжувалося, і в березні 2021 р. турбіни було введено в експлуатацію. Просторову конфігурацію конфлікту відображено на картосхемі 2.

---

[8] Горбач Л. М., Рубан О. О., Гуменюк Я. М. Зелена економіка та стале виробництво в умовах глобалізації. *Економіка та суспільство*. 2024. № 59.

[9] Normann S. Green Colonialism in the Nordic Context: Exploring Southern Saami Representations of Wind Energy Development. Journal of Community Psychology. 2021. Vol. 49. No. 1. P. 77–94. DOI: 10.1002/jcop.22422.



Картосхема 2. Територіальний конфлікт довкола вітропарку Фосен: вітроелектростанції Storheia і Roan у зоні оленярських дистриктів південних саамів

Умовна картосхема; межі та контури наближені. Складено автором на основі [8; 9]

11 жовтня 2021 р. Верховний суд Норвегії одноголосним рішенням визнав, що видані концесії є недійсними, оскільки будівництво вітроелектростанцій порушує право саамських оленярів на користування власною культурою, гарантоване статтею 27 Міжнародного пакту про громадянські і політичні права, який інкорпоровано в норвезьке законодавство Законом про права людини 1999 р. і який має пріоритет над іншими національними нормативними актами у разі колізії. Це рішення набуло символічного значення як перший випадок, коли постраждала саамська сторона виграла судовий спір щодо проєкту освоєння традиційних територій, спираючись безпосередньо на міжнародні норми прав людини.

Показовим є те, що визнання концесій недійсними не спричинило негайного демонтажу об'єктів: вітроелектростанції продовжували працювати ще понад 600 днів після ухвалення рішення, що викликало серію протестних акцій та блокад під'їзних шляхів у 2023 р. з боку саамських активістів і природоохоронних організацій. Лише в грудні 2023 р. було досягнуто часткової угоди з південною групою постраждалих оленярів (щодо вітроелектростанції Storheia), а в березні 2024 р. – з північною

групою (щодо вітроелектростанції Roan). Угоди передбачають компенсаційні виплати, надання альтернативних пасовищних територій та право вето постраждалих громад щодо можливого подовження ліцензії після завершення терміну її дії у 2045 р.

Конфлікт довкола Фосена набув статусу «моменту розриву» усталеного соціотехнічного режиму управління енергетичними ландшафтами, продемонструвавши, що навіть у країні з високорозвиненими інститутами правової держави формальна перемога у суді не гарантує оперативного відновлення порушених прав, якщо це вимагає зупинення чи демонтажу вже функціонуючої інфраструктури. Ця колізія оприявнює структурну напругу між двома легітимними цілями сталого розвитку – прискореним нарощуванням потужностей відновлюваної енергетики та захистом прав територіальних спільнот на традиційне природокористування, – розв'язання якої потребує вдосконалення процедур завчасного, вільного й усвідомленого узгодження (проведення консультацій до, а не після ухвалення рішень про концесії) та перегляду ролі муніципального й регіонального рівнів у системі просторового планування енергетичних об'єктів.

Досвід Фосена підтверджує тезу про те, що територіальний та управлінський виміри сталого розвитку невіддільні від питання міжсекторної співпраці й довіри між державними органами та місцевими громадами: без визнання суб'єктності територіальних спільнот у процедурах прийняття рішень навіть екологічно обґрунтовані проєкти ризикують утратити соціальну легітимність[10]. Для Норвегії, як і для інших країн, що нарощують потужності відновлюваної енергетики, це означає необхідність перегляду балансу між централізованими енергетичними цілями держави та правом територіальних громад на участь у визначенні майбутнього власного простору.

Фосен є найбільш резонансним, але не поодиноким випадком: подібні суперечності супроводжували видачу концесій і для інших вітроенергетичних проєктів на території традиційного оленярства, зокрема на плато Оюфьеллет (Øyfjellet) у губернії Нурланн та в окремих районах губернії Тролделаг, де оленярські дистрикти також оскаржували рішення NVE щодо погодження меж та умов експлуатації вітропарків. Накопичення таких прецедентів спонукало норвезький уряд у 2023–2024 рр. ініціювати перегляд національної системи ліцензування вітроенергетичних об'єктів із запровадженням обов'язкового попереднього картографування зон традиційного оленярського природокористування (так званих

[10] Браславська О. В. Культурно-туристичні маршрути малих міст України: між збереженням історичної спадщини та сучасними викликами сталого розвитку. *Економіка і регіон*. 2025. № 4(99). С. 32–39. DOI: 10.26906/EiR.2025.4(99).4153

reindriftsområder) як складової частини процедури оцінки впливу на довкілля, що має унеможливити повторення ситуації, коли конфлікт інтересів виявляється вже після ухвалення рішення про концесію.

У перспективі розв'язання подібних конфліктів потребує щонайменше трьох взаємопов'язаних напрямів удосконалення просторового планування: по-перше, юридичного закріплення обов'язковості (а не лише дорадчого статусу) висновків Саметінгу щодо проєктів у межах традиційних територій природокористування; по-друге, запровадження процедур завчасного картографування та громадського обговорення ще на стадії формування переліку перспективних майданчиків для розміщення вітроенергетичних об'єктів, а не після видачі концесії; по-третє, розроблення чіткого механізму компенсацій та розподілу вигод від експлуатації енергетичних об'єктів на користь територіальних громад, який діяв би за замовчуванням, а не формувався б лише внаслідок судових спорів і публічних протестів, як це сталося у випадку Фосена.

ВИСНОВКИ

Аналіз політико-географічних вимірів сталого розвитку Норвегії засвідчує, що ця країна є показовим, але внутрішньо суперечливим прикладом поєднання ресурсної економіки з кліматичним лідерством. Географічне положення на перетині трьох морських акваторій і розвинена система децентралізованого врядування створили інституційні передумови для ефективного управління ресурсною рентою, зокрема через механізм суверенного фонду добробуту, який дає змогу вилучити бюджетну політику з прямої залежності від цін на вуглеводні. Водночас структурна залежність експорту та бюджетних надходжень від нафтогазового сектору залишається визначальною рисою норвезької економіки, що формує дискурсивне протиріччя між статусом «зеленого» лідера та роллю одного з провідних світових постачальників викопного палива.

Інструменти кліматичного регулювання, насамперед вуглецевий податок і участь у системі торгівлі квотами ЄС, демонструють послідовне посилення цінового сигналу для найбільших емітентів, однак ефективність цих інструментів обмежується побічними ефектами інших політик (зокрема податкових пільг для електромобілів) і залишається недостатньою для повного розв'язання проблем ресурсоефективності та збереження біорізноманіття, на що прямо вказують рекомендації ОЕСР.

Територіальний конфлікт довкола вітропарку Фосен продемонстрував, що прискорене розширення відновлюваної енергетики без належного врахування прав територіальних спільнот здатне підривати соціальну легітимність кліматичної політики навіть у країнах із високорозвиненими

правовими інститутами. Це підтверджує тезу про те, що політико-географічний аналіз сталого розвитку не може обмежуватися суто економічними чи екологічними показниками – він обов'язково повинен враховувати просторовий і соціально-інституційний виміри ухвалення рішень.

Узагальнюючи розглянуті виміри – інституційний, ресурсно-економічний, регуляторний і територіально-конфліктний, – можна констатувати, що норвезька модель сталого розвитку є не статичним досягненням, а результатом постійного, часто напруженого узгодження між кількома конкуруючими логіками: логікою глобального ринку вуглеводнів, логікою довгострокового кліматичного планування та логікою захисту прав територіальних спільнот на традиційне природокористування. Стійкість цієї моделі забезпечується не відсутністю суперечностей між зазначеними логіками, а наявністю розвинених інституційних механізмів їх виявлення, судового розгляду та поступового узгодження, що, утім, як засвідчує випадок Фосена, не гарантує швидкого чи безболісного розв'язання конкретних територіальних конфліктів.

Для української суспільної географії та практики повоєнної відбудови норвезький досвід становить цінність передусім у трьох аспектах: як модель довгострокового управління ресурсною рентою в умовах реформованої децентралізованої системи влади; як приклад послідовного, хоча й не безконфліктного, розширення інструментів кліматичного регулювання; як застереження щодо необхідності інтеграції процедур узгодження інтересів територіальних громад у систему просторового планування енергетичних об'єктів на етапі, що передує ухваленню остаточних рішень, а не після нього.

АНОТАЦІЯ

У розділі розкрито політико-географічні виміри сталого розвитку Норвегії в умовах трансформації ресурсної, енергетичної та екологічної політики. Охарактеризовано географічні й інституційні передумови норвезької моделі управління природними ресурсами, роль нафтогазового сектору та Державного пенсійного фонду «Глобал». Проаналізовано інструменти кліматичного регулювання, розвиток відновлюваної енергетики і суперечність між кліматичним лідерством держави та збереженням значних обсягів експорту вуглеводнів. Особливу увагу приділено територіальним конфліктам навколо вітроенергетичних об'єктів на землях традиційного природокористування саамів, зокрема справі Фосен. Обґрунтовано значення норвезького досвіду для вдосконалення просторового планування, управління ресурсною рентою та забезпечення участі територіальних громад у прийнятті рішень.

Література

1. Буканов Г. М. Концепція сталого розвитку як основа формування державної екологічної політики на державному та регіональному рівнях. *Вчені записки Таврійського національного університету імені В. І. Вернадського. Серія «Публічне управління та адміністрування».* 2020. Т. 31(70). № 3. С. 71−76.

2. OECD. OECD Environmental Performance Reviews: Norway 2022. Paris: OECD Publishing, 2022. 154 p. DOI: 10.1787/59e71c13-en

3. Попович Н. В. Стратегії сталого розвитку країн Європи та їхні особливості. *Проблеми безперервної географічної освіти і картографії*. 2015. Вип. 22. С. 115–118.

4. Austvik O. G. Norway in the Geopolitics of Energy. Energy Policy. 2025. Vol. 198. Article 114410. DOI: 10.1016/j.enpol.2024.114410

5. Національний інститут стратегічних досліджень. Державна політика сталого розвитку на засадах «зеленої економіки» : аналітична записка. Київ : НІСД, 2013.

6. Bang G., Lahn B. A Petrostate's Outlook on Low-Carbon Transitions: The Discursive Frames of Petroleum Policy in Norway. *Energies.* 2021. Vol. 14. №. 17. Article 5411. Article 5411. DOI: 10.3390/en14175411

7. Башинська Ю. І. Екологічна політика в країнах світу в умовах розвитку екологічно свідомого суспільства. *Соціально-економічні проблеми сучасного періоду України.* 2021. Вип. 4. С. 22–27.

8. Горбач Л. М., Рубан О. О., Гуменюк Я. М. Зелена економіка та стале виробництво в умовах глобалізації. *Економіка та суспільство*. 2024. № 59.

9. Normann S. Green Colonialism in the Nordic Context: Exploring Southern Saami Representations of Wind Energy Development. *Journal of Community Psychology.* 2021. Vol. 49. No. 1. P. 77–94. DOI: 10.1002/jcop.22422

10. Браславська О. В. Культурно-туристичні маршрути малих міст України: між збереженням історичної спадщини та сучасними викликами сталого розвитку. *Економіка і регіон.* 2025. № 4(99). С. 32–39. DOI: 10.26906/EiR.2025.4(99).4153

Information about the author:
Braslavska Oksana,
Doctor of Pedagogical Sciences, Professor,
Professor at the Department of Geography and Tourism
Bogdan Khmelnitsky Melitopol State Pedagogical University
59, Naukovoho mistechka Street, Zaporizhia, Ukraine

CHAPTER 30

ГЕОГРАФІЧНІ ОСОБЛИВОСТІ ПОВОЄННОЇ ВІДБУДОВИ НІМЕЧЧИНИ: РІШЕННЯ У СФЕРІ МІСТОБУДУВАННЯ

Гукалова Ірина
DOI https://doi.org/10.30525/978-9934-26-714-7-30

ВСТУП

Дослідження досвіду відновлення Німеччини після Другої світової війни є дуже актуальним. Німеччина двічі за XX ст. ставала агресором і здійснювала терор у Європі, тож процес її післявоєнного відновлення означав вирішення не лише економічних чи міграційних питань або відбудову територій, а й формування принципово нової суспільної культури в умовах тих санкцій і обмежень, які були накладені на неї державами-переможцями. Контроль та урядування здійснювалися також ними. Проводячи паралелі з актуальним повномасштабним російським вторгненням в Україну, відзначимо, що німецький повоєнний досвід може бути затребуваним, насамперед, Росією як країною-агресором. Водночас Україна також може скористатися цим досвідом, передусім у сфері економічних перетворень та практичної відбудови зруйнованих міст і регіонів.

1. Руйнування території та передумови відновлення

Після війни Німеччина перестала існувати як незалежна держава, вона була окупована, а частина її територій відірвана. Тим гострішим було завдання відновлення економіки, відродження промислового виробництва, сільського господарства, торгівлі, фінансової та банківської систем, повернення життя народу до мирного укладу та нового розвитку системи державного управління. Увесь комплекс завдань щодо відновлення країни окупаційне, а потім і нове німецьке керівництво повинно було вирішувати під тиском політичної ситуації, коли істотно загострилися протиріччя між колишніми союзниками по антигітлерівській коаліції й фактично відбувся поділ країни.

У чотирирічний період після війни територія Німеччини була розділена між чотирма державами: США, Великою Британією, Францією і СРСР, які керували країною через спільний орган – Союзну контрольну комісію.

Розділ Німеччини на окупаційні зони відповідав колишнім кордонам адміністративно-територіального її поділу (за винятком Пруссії). Через два роки США та Британія об'єднали підконтрольні їм території, утворивши Бізонію. Ще через рік, у 1948 р., землі під адміністрацією Франції об'єдналися з Бізонією, утворивши Тризонію. Це стало основою нової держави – ФРН. Територія, що дісталася радянській окупаційній владі, була меншою: її основу становили п'ять східно-німецьких провінцій і земель, заснованих на місці чотирьох колишніх прусських провінцій (Померанія, Бранденбург, Саксонія і Сілезія) і трьох колишніх земель (Мекленбург, Тюрінгія і Саксонія), що мали різну історичну долю і правовий статус. Місто Берлін (відповідно до Ялтинських угод) фактично було виділено з радянської зони і передано під управління чотиристоронньої союзної комендатури та підконтрольного їй магістрату Великого Берліна. Частина земель Третього рейху була відрізана: Ельзас і Лотарингія повернулися до Франції; Східна Пруссія стала Калінінградською областю у складі СРСР; Пруссія, Померанія та Гданськ відійшли Польщі, Судети – Чехословаччині. Німці зі Східної Пруссії, Судетської області та інших територій вимушено прямували як у Західну, так і у Східну Німеччину, де війною вже була суттєво порушена статева структура населення: мільйони чоловіків загинули на фронті, перебували у полоні або зникли під час війни. Саме тому у перші часи після війни переважно жінкам і демонтажним компаніям, які пережили війну, довелося відновлювати економіку та міста Німеччини.

Після війни Німеччина лежала в руїнах, промислове виробництво було на рівні третини від довоєнного. Виробництво продуктів харчування на душу населення у 1947 р. становило лише 51% від рівня 1938 р.[1]. Життєвий рівень упав, гроші знецінилися, грошова маса не мала товарного покриття, поширювався бартерний товарообіг. Спостерігався дефіцит базових продуктів харчування, одягу та пального, були введені картки на продовольство. Особливо важкою була зима 1946/47 років. Вона увійшла в історію як «голодна зима», коли понад 400 тис осіб загинули від голоду чи замерзання[2].

Найбільш гострим було житлове питання, тому що значна частина житлового фонду була зруйнована. За даними науковців Інституту регіональної географії у Лейпцигу, з 18,8 млн квартир Німецького Рейху 4,8 млн були зруйновані або пошкоджені з утворенням 400 млн м³ завалів, унаслідок чого 13 млн жителів залишилися без даху над головою. Деякі великі міста, які майже до кінця війни залишалися неушкодженими

[1] Судачек Д. Післявоєнна відбудова ФРН. *Центр Дністрянського*. 12 вересня 2022 р. URL: https://dc.org.ua/news/reconstruction-germany

[2] Meier M. Wiederaufbau und Wirtschaft in der direkten Nachkriegszeit. 20.April 2022. URL: https://www.zukunft-braucht-erinnerung.de/wiederaufbau-und-wirtschaft-in-der-direkten-nachkriegszeit/

(Магдебург, Дрезден, Хемніц, Дессау та Плауен, а також середні міста Ханау та Пфорцгайм), в останні місяці війни були зруйновані вогняними бурями союзних авіаударів. Просторовий розподіл збитків був дуже гетерогенним, що визначалося перебігом повітряної війни і наземними боями на завершальному етапі за завоювання Рурської області та Берліна. Зокрема, на території майбутньої НДР було повністю зруйновано 9,4% житлового фонду від його обсягу у 1939 р., тоді як на території Федеративної Республіки Німеччина втрати становили 18,5%[3]. Разом із цим багато промислових підприємств після війни вцілілі, сільські та гірські райони також уникли масованих ударів.

Війна вплинула на великі, середні і малі міста Німеччини. Слід відзначити, що з 54 великих міст (1939 р.) лише Любек, Вісбаден, Галле та Ерфурт пережили Другу світову війну з відносно невеликими пошкодженнями. У рейтингу процентних утрат житлового фонду на першому місці за статистикою збитків знаходилися Вюрцбург (75%), за ним ідуть Дессау, Кассель, Майнц і Гамбург. Зі 151 середніх міст приблизно третина зазнала повного знищення понад 20% житлового фонду. Найбільше постраждали Пренцлау у Бранденбурзі та Дюрен у Північній Рейн-Вестфалії з понад 80%, за ними йдуть Пфорцгейм у Баден-Вюртемберзі, Ганау у Гессені, Цвайбрюккен у Рейнланд-Пфальці та Емден у Нижній Саксонії. Із малих міст 93 пережили значні воєнні руйнування. Особливо сильні руйнування зазнали центри міст, які з 1942 р. були ключовими цілями бомбардувань. У таких містах, як Дрезден, Кельн, Ессен, Дортмунд, Ганновер, Нюрнберг, Хемніц, Мюнстер, Золінген, Дармштадт і Бремерхафен центри були майже повністю знищені[4]. Відсутність ППО та ефективних сховищ була причиною таких колосальних утрат.

Відзначимо, що однією з найважливіших передумов відновлення є візуалізація рівня руйнувань і збитків. Зокрема, на с. 89 Національного атласу Німеччини (том 5: Села і міста) вміщено карту, яка засвідчує рівень руйнувань міст Німеччини протягом війни (рис. 1): для ілюстрації наслідків авторами було вибрано два показники – ступінь руйнувань міст та масштаби руйнувань їхніх центрів. Картографічна візуалізація наслідків бомбардувань здійснювалася протягом усього післявоєнного періоду, вона стала одним із найважливіших складників у роботі над Національним атласом у 2000-х роках і атрибутом історичної пам'яті.

[3] Bode, V. (2002) «Kriegszerstörung und Wiederaufbau deutscher Städte nach 1945», in Institut für Länderkunde (ed.) Nationalatlas Bundesrepublik Deutschland. Vol. 5: Dörfer und Städte (Spektrum Akademischer, Heidelberg) 88–91.

[4] Bode, V. (2002) «Kriegszerstörung und Wiederaufbau deutscher Städte nach 1945», in Institut für Länderkunde (ed.) Nationalatlas Bundesrepublik Deutschland. Vol. 5: Dörfer und Städte (Spektrum Akademischer, Heidelberg) 88–91.



Рис. 1. Воєнні руйнування міст Німеччини, 1939–1945 рр.

(*карта з т. 5 Національного атласу Німеччини, автори – В. Боде, К. Ханевинкель, Інститут регіональної географії, Лейпциг, 2002 р.*)[5]

[5] Bode, V. (2002) «Kriegszerstörung und Wiederaufbau deutscher Städte nach 1945», in Institut für Länderkunde (ed.) Nationalatlas Bundesrepublik Deutschland. Vol. 5: Dörfer und Städte (Spektrum Akademischer, Heidelberg) 88–91.

Зразу після капітуляції Німеччини в західних країнах існувало дві протилежні точки зору на її долю. Перша – так званий **каральний підхід, або план Моргентау.** Міністр фінансів США Генрі Моргентау запропонував перетворити Німеччину на аграрну країну та ліквідувати її промисловість, щоб унеможливити відродження німецької військової могутності. Головна ідея – деіндустріалізація, контроль за видобутком і переробкою сировини (насамперед залізної руди), а також поділ Німеччини на кілька дрібних, економічно слабких держав. Такий підхід застосовувався близько чотирьох років, поки не стало зрозуміло, що політика послаблення Німеччини створює більше проблем, аніж вирішує, а стратегічне значення країни для стабілізації усього європейського господарства є великим. На той момент СРСР почав посилювати свій вплив у Східній Європі, а підтримка лівих сил, зокрема комуністів, у західних країнах зростала.

У зв'язку із цим у США було ухвалено інший підхід: Німеччина мала стати частиною нового економічного порядку, що спирається на ринкову економіку та інтеграцію із Заходом. Так з'явився **План Маршалла** (Дж. Маршалл – тодішній державний секретар США, який у 1947 р. оголосив Програму відновлення Європи на чотири роки, згодом названу «Планом Маршалла», яка була прийнята Конгресом США у 1948 р.). Загальна сума асигнувань, виділених у рамках економічної допомоги за Планом 16 країнам Європи, становила з квітня 1948 по грудень 1951 р. близько 12,4 млрд доларів, із яких на Західну Німеччину було виділено 1,3 млрд. Кошти були витрачені на заміну застарілого обладнання, оновлення виробництва, створення нових галузей економіки (нафтохімії, електроніки тощо), що сприяло прискореній індустріалізації відсталих регіонів. Спочатку План Маршалла передбачав можливість – нехай чисто теоретичну – надання допомоги і державам Східної Європи та СРСР. Але Москва не погодилася взяти участь у перемовинах через загрозу радянському суверенітетові. Відповідно, План перетворився на програму відновлення винятково західної частини Європи і Західної Німеччини. Майбутній НДР не дісталося ні цента з американських кредитів.

Окрему значну роль відіграли грамотна монетарна політика (грошова реформа і введення німецької марки), політична воля запроваджувати реформи (запуск вільного ринку) і конкретні постаті, які зробили свій внесок у майбутнє «німецьке економічне диво». У 1948 р. міністром економіки Людвігом Ерхардом та міністром фінансів Фріцом Шаффером утілюються в життя три взаємопов'язані реформи: грошова, цінова та податкова. Їхня мета – звільнення від маси знецінених грошей, відміна регулювання цін та розподілу, пільгове оподаткування дрібного і середнього бізнесу, захист прав споживача та свободи підприємництва.

Хоча здійснювалися вони методом «шокової терапії», позитивні наслідки німецька економіка почала відчувати вже впродовж першого року їх реалізації[6]. Поступово було подолано злидні (зникли натовпи погано одягнених і голодних людей, плавно скорочувалося безробіття), почалося зростання виробництва, імпорту та експорту.

Зауважимо, що реалізація Плану Маршалла в довготривалій перспективі фактично дала змогу створити військово-політичний блок НАТО та Європейський Союз. Історія об'єднаної Європи почалася зі спеціально заснованої для розподілу американської допомоги й проведення спільних проєктів Адміністрації Економічного Співробітництва. У 1950-х роках дана структура стала основою для утворення Європейського Економічного Співтовариства.

Паралельна **політика примирення** уможливила реінтеграцію громадян Німеччини у глобальну спільноту. Діяли програми обміну, інформаційні центри Великої Британії «Міст», програми міст-побратимів. Німці, як і сама Німеччина, із вигнанців перетворилися на повноправних партнерів. Політика примирення також полягала у репараціях, які виплачувала Німеччина. Загальний розмір репарацій був оголошений на Ялтинській конференції і становив 20 млрд дол. США (половина мала відійти СРСР)[7].

На тлі цього дії окупаційної влади в різних окупаційних зонах істотно відрізнялися: західні союзники пропонували плани відродження економіки Німеччини, а СРСР наполягав на збільшенні репарацій і всенародному референдумі щодо унітарного або федеративного її устрою. Згодом (у 1948 р.) припинила свою діяльність Союзна контрольна рада, і СРСР перекрив сухопутні та річкові шляхи між Західним Берліном та Західною Німеччиною[8]. Тоді як у Західній Німеччині приступили до реалізації Плану Маршалла, СРСР розпочав блокаду Берліна, таким чином відреагувавши на запровадження нової німецької марки і політику союзників протистояти комуністичній ідеології. Відповіддю з боку союзників стала гуманітарна операція «Повітряний міст» із постачання продукції до Західного Берліну літаками, яка тривала майже рік до зняття блокади. Усі ці події передували утворенню у 1949 р. Федеративної Республіки Німеччина і Німецької Демократичної Республіки, які в подальшому характеризувалися не лише

---

[6] Вербова О. Повоєнна відбудова економіки України на засадах сталого інноваційного розвитку: досвід Західної Німеччини. *Відбудова для розвитку: зарубіжний досвід та українські перспективи* : міжнародна колективна монографія / гол. ред. д.е.н. В. В. Небрат ; НАН України, ДУ «Ін-т екон. та прогнозув. НАН України». Київ, 2023. С. 129–145. URL: http://ief.org.ua/wp-content/uploads/2023/08/Reconstruction-for-development.pdf

[7] Судачек Д. Післявоєнна відбудова ФРН. *Центр Дністрянського*. 12 вересня 2022 р. URL: https://dc.org.ua/news/reconstruction-germany

[8] Каспрук В. Післявоєнне відродження Німеччини. 11 червня 2013 р. URL: https://viktorkaspruk.wordpress.com/2013/06/11/післявоєнне-відродження-німеччини-2/

різними ідеологіями розвитку, а й різними підходами до регіональної політики, містобудування і відновлення.

Відлік власне планування відновлення почався не з 1945 р., а з років війни. Після її закінчення Німеччина мала непогані передумови для успішної реконструкції, але тотальна бідність, наплив біженців, нестача матеріалів та відтік найвідоміших архітекторів за кордон не дали змоги цим можливостям розвинутися відразу, тому відбудова мала свої етапи.

2. Кейс Федеративної Республіки Німеччина

Особливості відновлення у Західній Німеччині були пов'язані із затвердженням федеративної системи устрою країни. До 1948–1949 рр. землі вже існували, а отже, на більшій частині німецької території не було потреби організовувати щось нове. Щоправда, кордони всіх земель за винятком чотирьох (Баварії, Гамбурга, Бремена і Саксонії) виявилися значно зміненими. Протягом 1945–1948 рр. у західних зонах окупації було проведено необхідні реформи адміністративного устрою, відновлено поділ на історичні землі, під контролем військових властей відроджено земельні ландтаги та уряди. Об'єднання англійської та американської зон окупації у так звану Бізонію у грудні 1946 р. призвело до формування об'єднаного органу влади та управління. Ним стала Економічна рада (травень 1947 р.), що обиралася ландтагами і була повноважена затверджувати фінансово-економічні рішення[9].

Основу західно-німецької стратегії післявоєнного відновлення становили засади господарської доцільності та соціальної справедливості. Пріоритет надавався активному державному стимулюванню виробництва товарів широкого вжитку, а також передбачалося стратегічне планування ключових економічних секторів. Урядом було взято курс на децентралізацію, декартелізацію та, певною мірою, «американізацію» німецької економіки[10]. Було прийнято низку ліберальних рішень, як-от скасування держконтролю за цінами на товари, скасування близько 90% регуляторних обмежень для бізнесу, уведення податкових пільг для збільшення експорту тощо. Переважну частину державного бюджету було спрямовано на підтримку підприємництва, натомість витрати на утримання державної машини залишалися мінімальними. Водночас держава залишила окремі обмежувальні механізми, зокрема фіксовані ціни на вугілля, чавун, сталеві вироби та газ. Але у цілому це була політика, у якій удало поєднувалися вільна конкуренція з елементами державного регулювання. Роль держави

[9] Кудряченко А. І. Федеративна Республіка Німеччина – друга німецька демократична держава. *Проблеми всесвітньої історії*. 2019. № 2(8). С. 140–158.

[10] Janik M. Economic and Political Reconstruction and Development of FRG in the Period after World War II. *Historia i Polityka*. 2021. № 36(43). P. 139–151. DOI: https://doi.org/10.12775/HiP.2021.018

полягала в тому, щоб захищати ринкову економіку від монополізму. При цьому пряме втручання держави в операційну діяльність конкретних підприємств виключалося. Західні союзники не вивозили обладнання, як це робив СРСР у своїй зоні окупації за рахунок репарацій, не дозволяли мародерствувати. Це є важливим аспектом для розуміння стартових умов відновлення економіки післявоєнної Західної Німеччини[11].

Центральна координація відбудови в західній частині була слабкою: союзники блокували загальнонімецькі інституції, а землі відчайдушно охороняли власні компетенції. Федеральний уряд до 1960 р. мав досить обмежений вплив на містобудівну політику; основні закони ухвалювали землі. Характер відновлення змінювався з часом: у перші роки після війни домінували локальні ініціативи і необхідність дати людям дах над головою, хоча через десятиріччя думки планувальників були пов'язані з широким постмодерним переосмисленням міського простору, що вплинуло на ті об'єкти і території, які до 1980-х років ще не були відновлені.

Загалом доволі швидка відбудова територій у західних зонах окупації та у Федеративній Республіці Німеччина, як правило, була зорієнтована на історичну структуру поселень, оскільки підземна інфраструктура для водопостачання та відведення стічних вод у багатьох випадках була неушкодженою. Іншими чинниками були існуючі межі земельних ділянок та характер власності. З іншого боку, існувало багато містобудівних концепцій, які передбачали нове масштабне та швидке планування зруйнованих старих кварталів з їх щільною забудовою та вузькими вулицями. Із цієї перспективи руйнування здебільшого розцінювалося як шанс на новий початок та реалізацію ідеалів «сучасного містобудування». Концепції варіювали від реконструкцій із консервативною орієнтацією на традиції до абсолютно нового будівництва, яке ігнорувало старі структури та функції і прагнуло реалізовувати сучасні інноваційні задуми у будівництві.

Тип містобудівного планування в деяких містах визначався за зонами, частково залежно від ступеня руйнувань. У багатьох планах відновлення території з високим ступенем руйнувань були поділені на так звані «території перепланування» та власне «території відновлення». У зонах відновлення особлива увага приділялася подальшому використанню історичних будівель та наближенню форм відновлення до попереднього стану, особливо для історичних центрів міст[12].

---

[11] Юровський Б., Слюсар Н., Стройко Т. Німецьке економічне диво Аденауера та Ерхарда. 25 березня 2025. URL: https://www.ilibertyinstitute.org/articles/nimeczke-ekonomichne-divo-adenauera-ta-erhada

[12] Enss Carmen M. Heritage Making im Wiederaufbau. In: Atlas Kriegsschadenskarten Deutschland, Stadtkartierung und Heritage Making im Wiederaufbau um 1945. December 2022. URL: https://www.researchgate.net/publication/366206330_Kapitel_6_Heritage_Making_im_Wiederaufbau

До війни міста були позначені історичними будівлями та вулицями, які часто сягали середньовіччя, тому центральною проблемою у містах, що постраждали від війни, стало належне поводження із цінними будівлями. Ця проблема збереження пам'яток культури частково визначила також процеси їх відновлення. Прикладами відновлення зі збереженням історичного планування та відповідних ансамблів були старе місто Мюнстера та історичні центри Фройденштадта і Нюрнберга.

Відповідно до плану відновлення старого міста (Altstadt) ***Нюрнберга*** від 1950 р., мало бути відновлено не лише важливі пам'ятки архітектури, а й збережено історичну концепцію простору. Мета відновлення – збереження характерного міського ландшафту із замком, ратушею, міськими церквами за одночасного оновлення. Історичні будівлі відтоді лишаються орієнтирами для навколишньої нової забудови. Включення всього ансамблю старого міста Нюрнберга до Списку пам'яток архітектури Баварії у 1984 р. стало визнанням цього концептуального та містобудівного досягнення повоєнного періоду[13].

На відміну від цього у ***Касселі***, наприклад, була затверджена сучасніша розріджена забудова, а зруйновану нижню частину міста спланували з урахуванням перспектив розвитку автотранспорту. У цьому місті навіть стадіон Auestadion, будівництво якого завершилося у 1953 р., стоїть на руїнах часів Другої світової війни[14].

Заможний ***Мюнхен*** відновили досить швидко, причому максимально консервативно слідуючи довоєнному генплану. Хоча місто було настільки зруйнованим, що існували плани побудувати його «з нуля» на озері Штарнберг. Однак завдяки Карлу Мейтінгеру, тодішньому міському планувальнику Мюнхена, ці плани було відхилено. Місто було реконструйовано. Зокрема, з 12 пошкоджених храмів, розташованих у старому місті, 11 було повністю відновлена. Через 12 років після закінчення війни населення Мюнхена перевищило 1 млн осіб[15], тобто більше ніж подвоїлося. Уже до 1960-х років місто стало одним із головних політичних, економічних і культурних центрів Європи. Сюди потягнулися люди з усієї країни, а тому нестачі як у фінансуванні, так і в робочій силі не було. Як підсумок, Мюнхен нині виглядає ідеально й автентично, ніби нічого і не руйнувалося.

---

[13] Bauernfeind M. Weichenstellungen für den Wiederaufbau in Nürnberg. URL: https://www.pro-pellerhaus.de/wp-content/uploads/2021/04/Arbeitsheft15_2015_TagungPaderborn_AufsatzBauernfeind.pdf

[14] Siemon T. Kassel: Neubeginn in einer Ruinenstadt nach 1945. 18.10.2023. URL: https://www.hna.de/kassel/neubeginn-in-einer-ruinenstadt-91873928.html

[15] Nickels L. Wiederaufbau der Stadt München nach 1945. URL: https://www.planet-wissen.de/kultur/metropolen/muenchen_zwischen_renaissance_und_wolkenkratzern/wiederaufbau-nach-1945-100.html

Відбудова ***Кельна*** тривала з перших повоєнних років і до 1990-х. У 1946 р. архітектор і міський планувальник Рудольф Шварц, який наприкінці війни описав Кельн як «найбільшу купу уламків у світі», був призначений керівником Офісу реконструкції і в 1947 р. представив свій план відновлення. Хоча знесення, здається, передбачало різні варіанти реконструкції, планувальники вирішили відновити середньовічну центральну частину міста. Більшість вузьких вулиць було збережено, а будівлі відновлені до їхнього початкового довоєнного стану. Єдине, що було переглянуто, – це функція центральних вулиць, яка змістилася в бік офісних і комерційних об'єктів, що стало основою для створення великої пішохідної зони[16].

Фаза інтенсивного відновлення у Федеративній Республіці Німеччина завершилася вже у 1970-х роках. Хоча деякі об'єкти і території підпали під реновацію значно пізніше. Важливими чинниками різноманітного оновлення окремих міст були конституційне забезпечення місцевого самоврядування та відповідне право самостійно планувати розвиток міста і відновлення. У цілому відбудова у ФРН була успішною з погляду кількісних показників (ліквідація житлової кризи, інтеграція біженців). Проте вона супроводжувалася суперечками між модернізмом і традиціоналізмом, між централізованими та локальними підходами. Дискусії про «гуманну» та «сучасну» архітектуру не припиняються й досі.

3. Кейс Німецької Демократичної Республіки

Радянська економічна політика в Німеччині відрізнялася суперечливістю поставлених цілей і досягнутих результатів. Отримання репарацій було пріоритетною її метою. Саме тому однією з найважливіших економічних реформ була націоналізація та реструктуризація промисловості. На першому етапі, відразу після закінчення війни, йшлося про фактичну експропріацію заводів і фабрик, власники яких мігрували на Захід.

В економічній та адміністративній політиці поєднувалися різні тенденції: з одного боку, за допомогою репарацій максимально сприяти відновленню та посиленню військової та економічної могутності СРСР і ослабленню Німеччини, щоб назавжди усунути німецьку загрозу миру; з іншого боку – відновити економіку Німеччини (спочатку до рівня, необхідного для виплати репарацій і забезпечення нормального існування німецького населення, потім – до рівня «молодшого соціалістичного брата», який буде підтримувати СРСР).

[16] Ошемкова К. Кельн. Реконструкція як збереження міської ідентичності. 06 червня 2022 р. URL: https://pragmatika.media/keln-rekonstrukcija-jak-zberezhennja-miskoi-identichnosti/

Процес реформування адміністративно-територіального устрою Східної Німеччини після Другої світової війни був також пов'язаний із реорганізацією земель відповідно до нових кордонів Німеччини. Але з прийняттям конституцій земель, де були зафіксовані їхні повноваження, і розробленням Конституції НДР відбувався поступовий перехід до унітаризму. Радянське керівництво не бачило підстав для федералізму в мононаціональній країні.

Поголовна денацифікація керівних кадрів на всіх рівнях відразу після війни призвела до величезного дефіциту фахівців у різних галузях економіки. Поділом Німеччини на зони було перервано традиційні економічні зв'язки, а початок «холодної війни» унеможливив їх відновлення. Східна Німеччина була вимушена орієнтуватися виключно на Радянський Союз.

У радянській зоні окупації ресурси будівництва спочатку зосереджувалися на ліквідації завалів, тимчасовому ремонті та маленьких відновлювальних роботах із відбудови зруйнованих квартир. Через величезні репараційні зобов'язання перед СРСР масштабні роботи з відбудови в НДР почалися лише між 1955 та 1970 рр.

27 липня 1950 р. уряд НДР ухвалив 16 принципів містобудування. Вони стали переломним моментом в архітектурній політиці НДР і заклали основи реконструкції, яка базувалася на радянській моделі. Ними було закладено основу для масштабних реконструкцій та створення великих ансамблів, особливо в містах першої категорії (рис. 2). Нерідко цей документ розглядають як антитезу Афінської хартії міст. Структура міста складалася з політичного центру з площами, проспектами для маршів, демонстрацій і житлових мікрорайонів. Стрижень концепції розкривається через цитату третього принципу: «Міста «самі по собі» не виникають і не існують. Міста значною мірою будуються промисловістю для промисловості. Зростання міста, чисельність населення та площа визначаються факторами, що формують місто, а саме промисловістю, адміністративними органами та культурними об'єктами, наскільки вони мають більше, ніж місцеве значення. У столиці важливість промисловості як чинника урбанізації відходить на другий план на користь адміністративних органів і культурних об'єктів. Визначення та підтвердження чинників, що формують місто, є виключно справою уряду»[17]. У 1950 р. урядом НДР було визначено 53 міста чи райони, що заслуговували на особливу підтримку[18].

[17] Die 16 Grundsätze des Städtebaus. URL: https://www.bpb.de/themen/nachkriegszeit/wiederaufbau-der-staedte/64346/die-16-grundsaetze-des-staedtebaus

[18] Bode, V. (2002) «Kriegszerstörung und Wiederaufbau deutscher Städte nach 1945», in Institut für Länderkunde (ed.) Nationalatlas Bundesrepublik Deutschland. Vol. 5: Dörfer und Städte (Spektrum Akademischer, Heidelberg) 88–91.

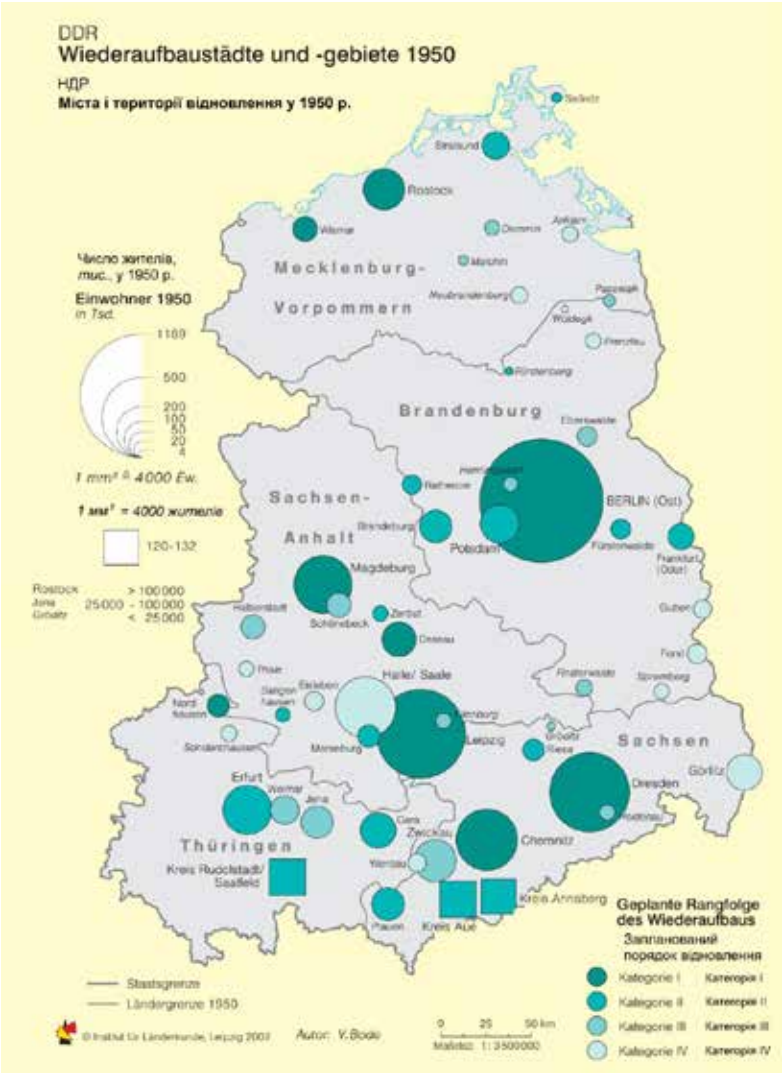


Рис. 2. Міста і території відновлення у Східній Німеччині (1950 р.)

(*карта з т. 5 Національного атласу Німеччини, автори – В. Боде, К. Ханевинкель, Інститут регіональної географії, Лейпциг, 2002 р.*)[19]

[19] Bode, V. (2002) «Kriegszerstörung und Wiederaufbau deutscher Städte nach 1945», in Institut für Länderkunde (ed.) Nationalatlas Bundesrepublik Deutschland. Vol. 5: Dörfer und Städte (Spektrum Akademischer, Heidelberg) 88–91.

Якби не консолідований опір міської інтелігенції та «традиціоналістів», то багато зруйнованих східнонімецьких міст були б повністю зачищені від спадщини вже в перше повоєнне десятиліття. Більшість ідей про радикальну архітектурну революцію залишилися нереалізованими, оскільки необхідно було терміново забезпечити житлом знедолені сім'ї. І як базовий у НДР (і у ФРН) використовували так зване тимчасове житло.

Зокрема, бездомні жили в «хатинах Ніссена», які були розроблені канадським інженером Пітером Ніссеном ще в роки Першої світової війни. Вони являли собою збірні укриття з дахом із металевого профнастилу без будь-якої ізоляції чи оздоблення для тимчасового перебування. Зрозуміло, що умови життя в таких приміщеннях були дуже важкими (рис. 3).



Рис. 3. Тимчасове укриття – «хатини Ніссена»
(фото із сайту https://www.ndr.de[20])

Після війни у багатьох містах почали зводити нові райони з так званими «панельками». Перевагу було надано швидкому вирішенню проблеми розселення людей. І лише після падіння Берлінського муру та об'єднання Німеччини в багатьох містах взялися наводити лад в історичних центрах.

Орієнтирами містобудування НДР було підкреслено особливе значення центрів міст. Зокрема, у п. 6 зазначено: «Центр формує визначальне ядро міста. Центр міста є політичним центром життя його населення. У центрі міста розташовані найважливіші політичні, адміністративні та

[20] Nissenhütten: Unterkünfte für Ausgebombte nach dem Krieg. 10.06.2025. URL: https://www.ndr.de/geschichte/schauplaetze/Nissenhuetten-Unterkuenfte-fuer-Ausgebombte-nach-dem-Krieg,nissenhuetten104.html

культурні об'єкти. Площі у центрі міста – це місце, де проходять політичні демонстрації, марші та народні святкування у святкові дні. Центр міста побудований найважливішими та монументальними будівлями, домінує в архітектурній композиції міського плану та визначає архітектурний силует міста»[21]. Відповідно, зруйновані центри міст були незалежно від первісних меж ділянок переважно повністю перебудовані, тим більше що захоплені ділянки зазвичай переходили у народну власність. Типові ансамблі 1950-х років планувалися архітекторами в дусі соціалістичного реалізму і класицизму СРСР. Першим взірцем монументальності був проєкт «Сталіналеє» (на честь Сталіна) у Східному Берліні (рис. 4), у якому було втілено вищезазначений принцип розбудови центру. Іншими прикладами є: площа Россплац (у Лейпцигу як частина муніципального ландшафтного парку – «Променадне кільце»), Ланге-Штрассе у м. Росток (рис. 5) та дрезденський Старий ринок.



Рис. 4. Колишня Сталіналеє у Берліні тепер має назву Карл-Маркс-Алеє

(фото із сайту https://www.berliner-leben.de[22])

У ***Дрездені*** історичний центр міста розібрали буквально по цеглинках. Фрагменти історичних будівель, що представляли культурну

[21] Die 16 Grundsätze des Städtebaus. URL: https://www.bpb.de/themen/nachkriegszeit/wiederaufbau-der-staedte/64346/die-16-grundsaetze-des-staedtebaus

[22] DDR-Prestigeobjekt als Weltkulturerbe. URL: https://www.berliner-leben.de/stadt/architektur/ddr-prestigeobjekt-als-weltkulturerbe

цінність, пронумерували й відклали на майбутнє для реставрації, а решта пішла на будматеріал для майбутніх мікрорайонів у стилі радянського реалізму. Знакові будівлі Дрездену (наприклад, Оперний театр чи Цвінгер) усе ж таки були спроєктовані так, щоб зберегти довоєнний вигляд. Проте архітектурний вигляд багатьох будівель був осучаснений. Часто висміюванні західними архітекторами як робітничі палаци «пряничного» або «кондитерського» стилю, будівлі з даних проєктів були тим не менше згодом були визнані як архітектурні та історичні пам'ятки.



Рис. 5. Місто Росток, Ланге-штрассе, північна забудова, 2013 р. *(фото зі статті[23])*

Отже, у НДР із 1950 р. відбувалася комплексна реорганізація простору за новими політично мотивованими моделями міського планування. Однак руйнування центрів міст унаслідок війни були настільки масштабними, що окремі міста втратили своє обличчя і, отже, свою ідентичність, а відновлення та подальший післявоєнний розвиток у деяких випадках не змогли усунути або компенсувати ці збитки, так що мешканці цих міст і досі сумують за втратою історично сформованої архітектурної спадщини. Навіть через 80 років після закінчення Другої світової війни деякі архітектурні рани міст ще не загоїлися, і відновлення триває.

[23] Kirchner J. Die lange Straße in Rostock (1953–58). Heimatschutzstil als eine Quelle der frühen DDR-architektur. Bd. 58 (2013): ICOMOS – Hefte des Deutschen Nationalkomitees. DOI: https://doi.org/10.11588/ih.2013.4.20083

ВИСНОВКИ

Відбудова у ФРН і НДР мала спільну відправну точку – дуже значне руйнування міст різних категорій після війни, проте її орієнтація була різною виходячи з різних політичних та ідеологічних рамок. У ФРН переважали децентралізовані ініціативи, ринкові механізми та поступовий перехід від функціоналізму до постмодернізму. У НДР – централізоване планування, соціалістичні «принципи містобудування», спочатку сталінський монументалізм, а згодом – індустріалізоване житлове будівництво та часткове повернення до реконструкції історичних центрів (рис. 6).

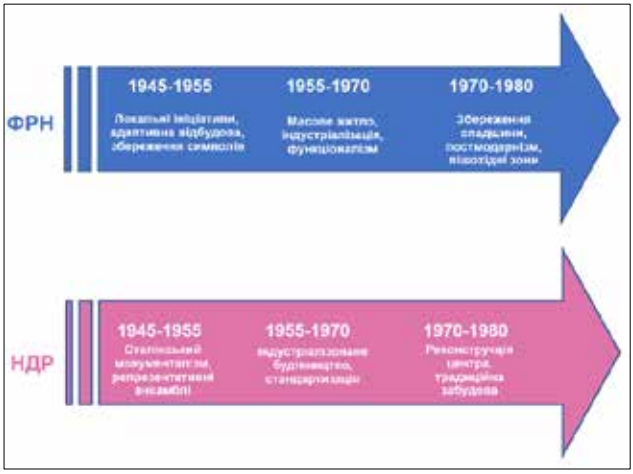


Рис. 6. Етапи повоєнної відбудови в ФРН і НДР: основні акценти *(побудовано автором)*

Моделі відновлення обох країн досить швидко вирішили проблему житла, але різними шляхами: ФРН – через ринок і соціальну політику, НДР – через директивне планування та стандартизацію. Західна Німеччина набагато швидше почала відновлювальні роботи завдяки фінансуванню у тому числі в рамках Плану Маршалла. Якщо на Заході формувалося доволі плюралістичне архітектурне середовище, то в НДР архітектура була інструментом ідеології. Хоча у 1980-х роках і там увагу стали звертати на збереження історичних центрів як елемента культурної легітимації режиму.

Обговорення проєктів реконструкції, які досі продовжуються вже в Об'єднаній Німеччині, характеризуються тим, що вони відбуваються з тривалим інтервалом після закінчення Другої світової війни. Ба більше, є робота над помилками і перегляд сумнівних рішень, які колись були

прийняті: подібні проєкти не є рідкістю, особливо у Східній Німеччині, деякі з них можна розглядати як пізнє завершення післявоєнної реконструкції.

АНОТАЦІЯ

Матеріал репрезентує аналіз історичного досвіду повоєнної реконструкції економіки та відновлення у Німеччині, яка підпала під найбільше в історії руйнування внаслідок союзних бомбардувань. Наведено масштаби руйнувань, охарактеризовано основні принципи відновлення постраждалих міст у перші повоєнні роки і поетапно після утворення ФРН і НДР у 1949 р. Проаналізовано основні відмінності просторових моделей відновлення, їхні інституційні рамки і передумови з наведенням прикладів реконструкції частин конкретних міст. Географам цей досвід цікавий тим, що він є класичним прикладом просторової трансформації території під впливом екстремальних чинників: війни, масових руйнувань, міграцій, зміни політичних режимів та економічних моделей.

Література

1. Судачек Д. Післявоєнна відбудова ФРН. *Центр Дністрянського*. 12 вересня 2022 р. URL: https://dc.org.ua/news/reconstruction-germany

2. Meier M. Wiederaufbau und Wirtschaft in der direkten Nachkriegszeit. 20. April 2022. URL: https://www.zukunft-braucht-erinnerung.de/wiederaufbau-und-wirtschaft-in-der-direkten-nachkriegszeit/

3. Bode, V. (2002) «Kriegszerstörung und Wiederaufbau deutscher Städte nach 1945», in Institut für Länderkunde (ed.) Nationalatlas Bundesrepublik Deutschland. Vol. 5: Dörfer und Städte (Spektrum Akademischer, Heidelberg) 88–91.

4. Вербова О. Повоєнна відбудова економіки України на засадах сталого інноваційного розвитку: досвід Західної Німеччини. *Відбудова для розвитку: зарубіжний досвід та українські перспективи* : міжнародна колективна монографія / гол. редкол. д.е.н. В. В. Небрат ; НАН України, ДУ «Ін-т екон. та прогнозув. НАН України». Київ, 2023. С. 129–145. URL: http://ief.org.ua/wp-content/uploads/2023/08/Reconstruction-for-development.pdf

5. Судачек Д. Післявоєнна відбудова ФРН. *Центр Дністрянського*. 12 вересня 2022 р. URL: https://dc.org.ua/news/reconstruction-germany

6. Каспрук В. Післявоєнне відродження Німеччини. 11 червня 2013 р. URL: https://viktorkaspruk.wordpress.com/2013/06/11/післявоєнне-відродження-німеччини-2/

7. Кудряченко А. І. Федеративна Республіка Німеччина – друга німецька демократична держава. *Проблеми всесвітньої історії*. 2019. № 2(8). С. 140–158.

8. Janik M. Economic and Political Reconstruction and Development of FRG in the Period after World War II. *Historia i Polityka*. 2021. № 36(43). P. 139–151. DOI: https://doi.org/10.12775/HiP.2021.018

9. Юровський Б., Слюсар Н., Стройко Т. Німецьке економічне диво Аденауера та Ерхарда. 25 березня 2025. URL: https://www.ilibertyinstitute.org/articles/nimeczke-ekonomichne-divo-adenauera-ta-erhada

10. Enss Carmen M. Heritage Making im Wiederaufbau. In: Atlas Kriegsschadenskarten Deutschland, Stadtkartierung und Heritage Making im Wiederaufbau um 1945. December 2022. URL: https://www.researchgate.net/publication/366206330_Kapitel_6_Heritage_Making_im_Wiederaufbau

11. Bauernfeind M. Weichenstellungen für den Wiederaufbau in Nürnberg. URL: https://www.pro-pellerhaus.de/wp-content/uploads/2021/04/Arbeitsheft15_2015_TagungPaderborn_AufsatzBauernfeind.pdf

12. Siemon T. Kassel: Neubeginn in einer Ruinenstadt nach 1945. 18.10.2023. URL: https://www.hna.de/kassel/neubeginn-in-einer-ruinenstadt-91873928.html

13. Nickels L. Wiederaufbau der Stadt München nach 1945. URL: https://www.planet-wissen.de/kultur/metropolen/muenchen_zwischen_renaissance_und_wolkenkratzern/wiederaufbau-nach-1945-100.html

14. Ошемкова К. Кельн. Реконструкція як збереження міської ідентичності. 06 червня 2022 р. URL: https://pragmatika.media/keln-rekonstrukcija-jak-zberezhennja-miskoi-identichnosti/

15. Die 16 Grundsätze des Städtebaus. URL: https://www.bpb.de/themen/nachkriegszeit/wiederaufbau-der-staedte/64346/die-16-grundsaetze-des-staedtebaus

16. Nissenhütten: Unterkünfte für Ausgebombte nach dem Krieg. 10.06.2025. URL: https://www.ndr.de/geschichte/schauplaetze/Nissenhuetten-Unterkuenfte-fuer-Ausgebombte-nach-dem-Krieg,nissenhuetten104.html

17. Die 16 Grundsätze des Städtebaus. URL: https://www.bpb.de/themen/nachkriegszeit/wiederaufbau-der-staedte/64346/die-16-grundsaetze-des-staedtebaus

18. DDR-Prestigeobjekt als Weltkulturerbe. URL: https://www.berliner-leben.de/stadt/architektur/ddr-prestigeobjekt-als-weltkulturerbe

19. Kirchner J. Die lange Straße in Rostock (1953–58). Heimatschutzstil als eine Quelle der frühen DDR-architektur. Bd. 58 (2013): ICOMOS – Hefte des Deutschen Nationalkomitees. DOI: https://doi.org/10.11588/ih.2013.4.20083

Information about the author:
Gukalova Iryna,
Doctor of Geographical Sciences, Professor
Institute of Geography of the National Academy of Sciences of Ukraine
44, Volodymyrska Street, Kyiv, Ukraine

CHAPTER 31

ПОВОДЖЕННЯ З ГІРНИЧОПРОМИСЛОВИМИ ВІДХОДАМИ У ЛЬВІВСЬКІЙ ОБЛАСТІ: ПРОБЛЕМИ НАКОПИЧЕННЯ ТА ЕФЕКТИВНІСТЬ ВИКОРИСТАННЯ

Іванов Євген, Войтків Петро, Корнус Анатолій
DOI https://doi.org/10.30525/978-9934-26-714-7-31

ВСТУП

Господарська діяльність людини породжує одну з найбільш нагальних проблем, а саме захист довкілля від шкідливого впливу відходів виробництва та споживання. Усе, що видобувається, виготовляється чи використовується людьми, із часом стає промисловим або побутовим сміттям. Очевидно, що питання накопичення та перероблення значних обсягів відходів є актуальним і для Львівської області. Розміщення таких відходів здійснюється відповідно до лімітів, встановлених Департаментом екології та природних ресурсів Львівської ОВА. Загальний обсяг дозволених лімітів для підприємств регіону щорічно змінюється, проте нині він не перевищує 5 млн т промислових і побутових відходів[1]. Ситуація з отриманням лімітів на розміщення відходів I–III класів небезпеки залишається неоднозначною. Зокрема, у деякі роки дозволи на накопичення відходів I класу небезпеки у Львівській області не видавалися загалом, а обсяги для відходів II класу коливаються в широкому діапазоні (до 1 500 т)[2].

На практиці ж існує значний розрив між кількістю наданих лімітів і реальними обсягами накопичення промислових і побутових відходів. На Львівщині кількість відходів невпинно зростає: якщо у 2001 році цей показник становив 44,3 млн т, то до 2005 року він зріс до 110,3, у 2010 році – до 174,5, а у 2015 році – до 230,0 млн т. Лише за останнє десятиліття спостерігаємо тенденцію до незначного зниження накопичених обсягів

[1] Регіональний план управління відходами у Львівській області до 2034 року / Львівська ОДА; ТОВ «Компанія «Центр ЛТД»». Львів, 2025. 475 с. URL: https://loda.gov.ua/documents/156928

[2] Стратегія розвитку Львівської області на період 2021–2027 років. Львів, 2019. 123 с. URL: https://loda.gov.ua/documents/49999

(у 2017 році – 221,5 млн т). Офіційні ж дозволи на розміщення охоплюють лише 4–5% від загальної маси відходів, накопичених у регіоні.

Щороку обсяги накопичення відходів I–III класів небезпеки у Львівській області зазнають змін. Варто зауважити, що кількість відходів I класу небезпеки зросла вдвічі (від 20 т у 2010 році до 40 т у 2017 році), а обсяги відходів II (236–503 т) та III (194–2102 т) класів демонструють значні коливання. Протягом останніх трьох років зафіксовано тенденцію до збільшення обсягів екологічно небезпечних промислових і побутових відходів.

Аналіз первинних даних Департаменту екології та природних ресурсів Львівської ОВА за 2022–2024 роки[3] дозволив визначити структуру накопичених на Львівщині промислових і побутових відходів. Зокрема, у 2024 році понад третину (37,0%) від загального обсягу становили відходи гірничодобувної промисловості, тоді як 20,4% припало на відходи медичного, ветеринарного, лісового, сільськогосподарського походження та фармацевтичної продукції. Водночас у Львівській області щороку зростають обсяги накопичення золи енерговиробництва (13,4%) та твердих побутових відходів (6,9%), рівень яких багаторазово перевищує встановлені ліміти. Значна частка шкідливих відходів (2,5%) утворюється внаслідок очищення дощових, промислових і побутових стічних вод. Окрім того, на неспеціалізованих майданчиках щороку розміщують великі обсяги забрудненого ґрунту, будівельного сміття, тирси, дефекатів, уживаних шин та інших відходів IV класу небезпеки. Проте найбільш критичною залишається ситуація зі збиранням і утилізацією екологічно небезпечних матеріалів: люмінесцентних ламп, нафтопродуктів, відпрацьованих мастил, моторних олив, акумуляторів, непридатних фарб тощо[4].

Більшість промислових відходів IV класу небезпеки утилізують на полігонах твердих побутових відходів. Відходи хімічної та гірничодобувної галузей збирають у спеціалізованих сховищах, тоді як відходи II та III класів небезпеки зберігають безпосередньо на промислових майданчиках. Загальні обсяги накопичення таких відходів щороку суттєво коливаються.

Серед ключових проблем у сфері поводження з небезпечними відходами I–III класів є досягнення екологічно безпечного зберігання та утилізації продуктів нафтопереробки, зокрема кислих гудронів, а також непридатних і заборонених пестицидів. Ці відходи накопичувалися

[3] Довкілля Львівської області. Статистичні дані 2022–2024 років. *Аналітичний портал SaveEcoBot.* URL: https://www.saveecobot.com/state-of-the-environment/lvivska-oblast

[4] Войтків П., Іванов Є., Наконечний Ю., Ваньо Н. Поводження з відходами у Львівській області: технології та стале управління. *Слобожанський науковий вісник.* Серія «Природничі науки». 2026. № 1. С. 155–162. DOI: 10.32782/naturalspu/2026.1.19

протягом 1960–1980-х років. Зокрема, кислі гудрони є продуктом діяльності Львівського дослідного нафтомастилозаводу, а також наслідком незаконного ввезення відходів з інших регіонів і держав. Потенційна загроза забруднення навколишнього природного середовища виникає через відходи, які імпортуються з Угорщини, а також через виготовлені з них модифікатори. Натепер в області зберігається 18,9 тис. т модифікатора та 1,2 тис. т нейтралізованих гудронних залишків[5]. Вони зібрані у трьох накопичувачах, розташованих поряд із Львівським сміттєзвалищем. На території площею 3,7 га в погано ізольованих резервуарах зберігається понад 500 тис. т нафтомастилової суміші II класу небезпеки. Це створює загрозу для здоров'я жителів сіл Великі Грибовичі та Збиранка[6]. Кислі гудрони потрапляють у навколишні водотоки, випалюють прилеглі території та забруднюють ґрунтові й підземні води.

Ще однією значною проблемою регіону є управління промисловими й медичними радіоактивними відходами на міжобласному спеціалізованому об'єкті Державної корпорації «Українське державне об'єднання «Радон»». Варто зазначити, що питання утилізації непридатних засобів захисту рослин поступово вирішується. Наприклад, у 2012 році було вивезено 355,97 т пестицидів[7].

У Львівській області зараз не спостерігається утворення значних обсягів небезпечних відходів. Це пов'язано з тим, що промислові галузі, як-от гірнича хімія і загалом хімічне виробництво, які 25–30 років тому були основними джерелами промислових відходів (до 90%), припинили чи значно скоротили свою діяльність[8]. Основними джерелами утворення небезпечних відходів I–III класів є нафтодобувні й нафтопереробні підприємства, зокрема НГВУ «Бориславнафтогаз» та ВАТ «НПК «Галичина»». Окрему категорію становлять так звані специфічні відходи, які викликають особливу тривогу через високу агресивність. До них належать фторорганічні сполуки, меланж, суміші кислот і розчинників. Загалом у регіоні їх накопичено понад 3,4 тис. т[9].

---

[5] Екологічний паспорт Львівської області за 2019 рік / Департамент екології та природних ресурсів Львівської ОДА. Львів, 2020. 265 с.

[6] Довкілля Львівської області – 2018: статистичний збірник / Головне управління статистики у Львівській області ; відп. за випуск Л. Шалай. Львів, 2019. 116 с.

[7] Іванов Є. Спектр геоекологічних проблем накопичення промислових відходів у Львівській області. *Вітчизняна наука на зламі епох: проблеми та перспективи розвитку :* матеріали 57-ої Всеукраїнської науково-практичної інтернет-конференції. Переяслав-Хмельницький, 2020. Вип. 57. С. 7–10.

[8] Екологічний паспорт Львівської області за 2024 рік / Департамент екології та природних ресурсів Львівської ОДА. Львів, 2025. 214 с. URL: https://deplv.gov.ua/ekologichnyj-pasport/

[9] Іванов Є. Геокадастрові дослідження гірничопромислових територій : монографія. Львів : ВЦ ЛНУ ім. Івана Франка, 2009. 372 с.

1. Геоекологічні проблеми, пов'язані з накопиченням і використанням гірничопромислових відходів

Накопичення та використання гірничопромислових відходів (розкривних порід, хвостів збагачення, шламів та шахтних вод) є джерелом масштабного антропогенного навантаження на природне середовище. В Україні ці відходи становлять понад 75% від загального обсягу промислового сміття, утворюють величезні техногенні родовища[10]. Тривале зберігання відходів у териконах, відвалах, хвостосховищах, відстійниках спричинює виникнення та розвиток деструктивних процесів, зокрема:

– *порушення геодинамічної стабільності.* Масивні відвали й хвостосховища створюють додаткове навантаження на земну поверхню та провокують техногенні землетруси, зсуви, селі, провали та деформації;

– *розвиток небезпечних морфодинамічних процесів.* Різним поверхням сховищ гірничопромислових відходів властивий прояв гравітаційних, зсувних і ерозійних процесів, затоплення і підтоплення тощо;

– *деградація земельних ресурсів*. Великі площі родючих земель вилучені з господарського обігу під сховища відходів; спостерігаються механічне руйнування, запилення та хімічне отруєння прилеглих ґрунтів;

– *забруднення підземних і поверхневих вод*. Атмосферні опади просочуються крізь товщу сховищ відходів, вилуговують важкі метали й утворюють високотоксичні кислі або лужні фільтрати;

– *забруднення атмосферного повітря.* Вітрова ерозія з поверхонь відвалів і хвостосховищ призводить до інтенсивного пилоутворення; самозаймання териконів супроводжується тривалим горінням із викидами оксидів сірки, азоту й вуглецю;

– *радіоактивне забруднення*. Окремі гірські породи та відклади мають підвищений природний фон радіоактивності та спричиняють виділення радону;

– *антропогенна трансформація ландшафтних систем.* Вилучення земель під сховища відходів змінює природні форми рельєфу, рослинний покрив, порушує міжландшафтні взаємозв'язки та мікрокліматичні умови, потребує проведення рекультивації.

Комплексне використання корисних копалин і впровадження безвідходних технологій дозволяють суттєво зменшити обсяги відходів. Значна їх частина може слугувати альтернативними джерелами енергії або дешевою сировиною для будівництва та промисловості[11]. Використання

---

[10] Сивий М., Паранько І., Іванов Є. Географія мінеральних ресурсів України : монографія. Львів : Простір М, 2013. 684 с.

[11] Іванов Є., Ковальчук І. Геоекологічні проблеми, пов'язані з використанням відходів гірничопромислових територій як енергетичного ресурсу. *Регіональні географічні дослідження України та суміжних територій :* збірник наукових праць. Луганськ : Альма-матер, 2006. С. 27–29.

гірничопромислових відходів (породи, хвости збагачення, золи) як вторинної сировини стикається з ризиками хімічного забруднення (вилуговування важких металів і токсичних елементів у відклади, ґрунти та воду), радіаційного фону, пило- і газоутворення та ризиком руйнування дамб, що потребує постійного геоекологічного контролю.

Головною особливістю сучасного гірничого виробництва в Україні залишається замала ефективність у видобуванні та переробленні сировини. У нинішніх умовах розвитку гірничодобувної промисловості недоліки в комплексному й повнішому використанні корисних копалин є неприйнятним марнотратством. Кожен відсоток втрат за досягнутих обсягів виробництва призводить до щорічної втрати 4,5 млн т залізної руди, 7 млн т вугілля і 300 тис. т кольорових металів. Нині спостерігаються тенденції до скорочення та стабілізації рівня втрат корисних копалин під час їх видобутку[12].

Зниження якості мінеральної сировини значною мірою, а часом і вирішально, впливає на економіку гірничодобувних галузей в Україні. Зольність енергетичного вугілля за останні 40 років зросла на 10%, тоді як теплота згоряння зменшилася на 13%. Це підвищення зольності в кам'яному вугіллі й антрациті призвело до зменшення надійності роботи парових котлів, зростання витрат на їхній поточний і капітальний ремонт, а також до частіших поломок через збільшення вмісту високоабразивної золи. Унаслідок низької якості спалюваного вугілля знижується потужність теплових електростанцій, і економіка щороку втрачає декілька мільярдів кіловат-годин. Водночас теплові електростанції збільшують обсяги викидів золи в атмосферу, а території для золовідвалів розширюються, де щорічно накопичується понад 100 млн т відходів.

Ефективність комплексного використання корисних копалин виявляють у різних напрямах. Більшість супутніх компонентів є цінними, і навіть часткове вилучення їх із мінеральної сировини дозволяє значно розширити сировинну базу промисловості, зменшити виробничі відходи, підвищити економічну ефективність та покращити екологічну ситуацію. Згідно із прогнозами, розробка техногенних родовищ в Україні могла б на 15–20% збільшити сировинну базу гірничодобувної промисловості[13].

Відходи вуглевидобування слугують низькосортним паливом і застосовуються для заповнення відпрацьованих шахт та у виробництві

[12] Сивий М., Паранько І., Іванов Є. Географія мінеральних ресурсів України : монографія. Львів : Простір М, 2013. 684 с.

[13] Іванов Є., Біланюк В. Ефективність використання мінеральної сировини і гірничопромислових відходів в Україні. *Надрокористування в Україні. Перспективи інвестування :* матеріали 2-ї Міжнародної науково-практичної конференції. Київ : ДКЗ, 2015. С. 344–351.

будівельних матеріалів. З іншого боку, відходи вуглезбагачення використовують як енергетичну сировину через спалювання або газифікацію, а також спрямовують на додаткове збагачення, отримання сірки й виробництво будівельних матеріалів. Вони застосовуються в будівництві насипів, закладанні підземних виробок і рекультивації земель. На багатьох цегельних заводах ці відходи використовуються як паливні та вигоряючі добавки під час виготовлення глиняної цегли, стінових блоків і керамічної цегли. Деякі підприємства навіть роблять їх основним сировинним компонентом[14].

Кам'яний відсів, що утворюється у процесі дробіння та обробки каменю, активно використовується як дорожньо-будівельний матеріал. В Україні широко застосовуються глинисті розкривні породи, які виникають під час видобутку різноманітних корисних копалин. Значні обсяги золошлакових відходів теплових електростанцій також застосовують у промисловості будівельних матеріалів. Полігони для зберігання радіоактивних відходів варто розглядати як потенційні родовища техногенної сировини. У разі поліпшення технологій вони можуть стати джерелом видобування та збагачення радіоактивних елементів.

Більшість гірничопромислових відходів використовується для засипання відпрацьованих кар'єрних площ, заповнення підземних гірничих виробок, а також рекультивації порушених орних і пасовищних земель. Переробка відвалів розкривних і вміщаючих порід дозволяє зменшити їхні площі та зберегти земельні ресурси. Вилучення корисних компонентів із хвостосховищ не лише приносить економічну вигоду, але й сприяє очищенню природного середовища від шкідливих домішок, як-от важкі метали й радіоактивні елементи, що шкідливі для здоров'я людей і біоти.

Загалом, раціональне використання техногенної мінеральної сировини зі сховищ гірничопромислових відходів сприятиме забезпеченню[15]:

– зменшення витрат на пошук нових родовищ корисних копалин і розвиток тих, що існують;

– збереження невідновлюваних мінеральних ресурсів і подовження строку роботи гірничодобувних і збагачувальних підприємств;

– виробництва більшої кількості доступних металів, а також нерудних, будівельних матеріалів і мінеральних добавок для покращення ґрунтів і добрив для сільського господарства;

[14] Іванов Є., Ковальчук І. Накопичення гірничопромислових відходів у Львівсько-Волинському кам'яновугільному басейні: сучасний стан, проблеми і перспективи поводження. *Український журнал природничих наук*. 2024. № 7. С. 75–84.

[15] Сивий М., Паранько І., Іванов Є. Географія мінеральних ресурсів України : монографія. Львів : Простір М, 2013. 684 с.

– заповнення відпрацьованих шахт і кар'єрів відходами, вирівнювання і планування посттехногенних ландшафтів, а також проведення інших заходів з рекультивації та ревіталізації;

– зменшення впливу на навколишнє середовище в гірничопромислових регіонах, яке позитивно вплине також на мешканців цих територій, поліпшення екологічної ситуації навколо видобувних і збагачувальних підприємств;

– вивільнення земель, зайнятих під сховища відходів гірничої промисловості, і усунення джерел забруднення довкілля;

– залучення додаткових фахівців для утилізації відходів і переробки техногенної сировини, що допоможе знизити рівень безробіття та соціальну напругу;

– підвищення продуктивності праці завдяки ефективній переробці вже видобутої сировини;

– поліпшення умов праці, оскільки техногенні родовища розташовані на поверхні, на відміну від небезпечних умов у шахтах і кар'єрах;

– залучення нових інвестицій з України та з-за кордону для оптимізації утилізації мінеральних ресурсів і вдосконалення технологій переробки техногенної сировини.

Упровадження енерго- та ресурсозбережувальних технологій у гірничодобувній і збагачувальній галузях може значно покращити екологічну ситуацію в Україні. Сучасні технології окупаються за короткий проміжок часу, до двох років, і забезпечують максимальний вихід кінцевого продукту на одиницю вихідної мінеральної сировини. Важливо також, що собівартість продукції з гірничопромислових відходів у 5–15 разів нижча, ніж із видобутої за традиційними методами руди із природних родовищ корисних копалин[16]. Проте нині використання техногенних відходів у виробничих процесах обмежене через низьку економічну спроможність держави.

Загалом, варто підкреслити значні можливості для більш ефективного використання мінерально-сировинних ресурсів і збільшення обсягів утилізації гірничопромислових відходів у цьому регіоні.

2. Обсяги накопичення гірничопромислових відходів

У Львівській області основну частину промислових відходів становлять залишки від гірничодобувної та енергетичної галузей, зокрема гірничі й розкривні породи, хвости збагачення, зола та фосфогіпси. За

[16] Іванов Є. Накопичення і використання гірничопромислових відходів у Львівській області: актуальні екологічні проблеми і шляхи їх вирішення. *Розроблення та реалізація регіональних Програм поводження з відходами: проблемні питання та кращі практики :* збірник матеріалів. Київ : Центр екологічної освіти та інформації, 2020. С. 77–81.

будь-якої технології видобутку корисних копалин виникають майданчики для промислових, зокрема й токсичних, відходів. Часто такі об'єкти експлуатуються з порушенням санітарних норм, що призводить до забруднення атмосфери, поверхневих і підземних вод, а також ґрунту та рослинності. Ці відходи є основними джерелами забруднення геосистем і створюють екологічну загрозу для здоров'я і безпеки населення регіону.

У 1990-х роках у відвалах, териконах, відстійниках і хвостосховищах накопичилося понад 1 млрд м^3 гірничопромислових відходів, серед яких 83,6 млн т становили надзвичайно токсичні речовини[17]. Після затоплення найбільших сірчаних кар'єрів регіону обсяг цих відходів значно зменшився і нині, за останніми підрахунками, становить 582,04 млн м^3 (див. табл. 1). Водночас площа, зайнята гірничопромисловими відходами, становить приблизно 44,2 км^2, майже 0,2% загальної площі області[18].

Таблиця 1

Основні об'єкти накопичення гірничопромислових відходів усіх класів небезпеки в межах Львівської області

Назва підприємства	Кількість об'єктів	Площа, га	Висота об'єктів, м	Обсяг відходів, млн м^3
Передкарпатська сірконосна провінція				
Яворівський ГПР	*7*	*2 184,3*	–	*280,61*
Зовнішній відвал № 1	1	289,1	40	61,32
Зовнішній відвал № 2	1	181,1	26	50,25
Зовнішній відвал № 3	1	197,2	37	47,91
Хвостосховище хвостів плавки	1	157,7	10	11,15
Тимчасове хвостосховище ЗФ	1	168,0	8	8,41
Хвостосховище «Віжомля»	1	515,1	4	12,42
Гідровідвал	1	626,6	26	87,12
Стави-відстійники	1	28,5	8	1,48
Відстійники ПВС	1	21,0	4	0,55
Роздільський ГПР	*13*	*1 531,7*	–	*160,92*
Відвал фосфогіпсів	1	19,2	19	2,87
Зовнішні і внутрішні відвали	3	82,7	15–27	11,87
Гідровідвал	1	438,1	12	34,17
Хвостосховища № 1 і № 2	2	325,8	8–12	23,29
Акумулюючий басейн	1	52,7	8	2,11

[17] Іванов Є. Ландшафти гірничопромислових територій : монографія. Львів : ВЦ ЛНУ ім. І. Франка, 2007. 334 с.

[18] Іванов Є. Накопичення і використання гірничопромислових відходів у Львівській області: актуальні екологічні проблеми і шляхи їх вирішення. *Розроблення та реалізація регіональних Програм поводження з відходами: проблемні питання та кращі практики :* збірник матеріалів. Київ : Центр екологічної освіти та інформації, 2020. С. 77–81.

Закінчення табл. 1

Назва підприємства	Кількість об'єктів	Площа, га	Висота об'єктів, м	Обсяг відходів, млн м^3
Відвали Подорожненського рудника	4	523,9	20–37	85,13
Акумулюючий басейн рудника	1	79,3	5	1,98
Разом	*20*	*3 716,0*	–	*442,03*
Львівсько-Волинський кам'яновугільний басейн				
ДП «Львіввугілля»	*25*	*224,5*	–	*57,37*
Шахта «Великомостівська»	2	9,6	8–12	0,88
Шахта «Бендюзька»	1	3,9	7	0,30
Шахта «Межирічанська»	3	28,6	11–16	3,08
Шахта «Відродження»	2	24,4	20–25	4,76
Шахта № 5 «Великомостівська»	3	23,0	24–27	4,19
Шахта «Лісова»	3	14,0	15–17	1,98
Шахта «Зарічна»	1	16,7	28	4,07
Шахта «Візейська»	3	12,3	28–33	3,51
Шахта «Надія»	2	14,5	33–37	4,59
Шахта «Степова»	1	15,5	22	3,37
Шахта № 1 «Червоноградська»	2	6,6	2	0,21
Шахта «Червоноградська»	1	17,9	30	4,39
Стави-відстійники шахт	1	37,5	5	0,40
ПАТ «Львівська вугільна компанія»	*4*	*285,9*	–	*66,28*
Гравітаційний відвал	1	86,4	64	48,89
Хвостосховище № 1	1	71,2	5	6,59
Хвостосховище № 2	1	63,1	12	9,60
Стави-відстійники ЗФ	1	65,2	5	0,80
Разом	*29*	*510,4*	–	*123,65*
Інші райони накопичення гірничопромислових відходів				
Стебницьке хвостосховище	1	163,7	16	13,09
Відвали Стебницького ГХП «Полімінерал»	2	3,5	5–9	0,32
Відвали АТ «Бориславський озокерит»	2	24,6	18–22	2,95
Разом	*5*	*191,8*	–	*16,36*
Разом по Львівській області	*54*	*4 418,2*	–	*582,04*

За рівнем небезпеки для довкілля і здоров'я людини відходи поділяються на інертні, які фактично і є гірничопромисловими. Ці відходи не підлягають хімічній обробці і в основному складаються з гірської породи з незначним вмістом корисних компонентів. До них належать гірські й розкривні породи кар'єрів, відвалів і териконів. Такі відходи належать

до малонебезпечних (III–IV класи), але вони є найбільшими за об'ємом. Набагато більшу загрозу для навколишнього середовища становлять відходи, отримані в результаті фізико-хімічної обробки гірничої сировини. Серед них виділяються хвости флотації сірчаних руд і збагачення вугілля[19]. Більшість утворених в області відходів (99,9% від загального обсягу) належить до IV класу небезпеки. Водночас було утворено 40 т відходів I класу, 503 т відходів II класу та 2 102 т відходів III класу[20].

Передкарпатська сірконосна провінція. Основними джерелами відходів у формі розкривних порід, флотаційних хвостів і фосфогіпсу виступали Яворівське (Новояворівське) і Роздільське державне гірничо-хімічне підприємство «Сірка» (рис. 1). За період їх діяльності у відвали було переміщено приблизно 636,5 млн м^3 порід, накопичилося 128,0 млн м^3 флотаційних карбонатних хвостів і 3,0 млн т фосфогіпсу[21]. Під їх складування використано понад 3,7 тис. га земель. На території Яворівського ГХП «Сірка» на площі 2,39 тис. га зібрано понад 336,0 млн м^3 різноманітних гірничопромислових відходів. Після затоплення сірчаних кар'єрів площі з відходами зменшилися і натепер становлять 442,03 млн м^3, зокрема в межах Яворівського ГПР – 280,61 млн м^3, Роздільського ГПР – 160,92 млн м^3.

Більшість відвалів і хвостосховищ розташовані на території Яворівського, Роздільського та Подорожненського сірчаних кар'єрів. На Яворівщині, навколо кар'єру, височать три зовнішні відвали, які є найбільшими в регіоні за площею: № 1 (289,1 га), № 3 (197,2 га) і № 2 (181,1 га). Значні площі відвалів нині вирівняно й вкрито панелями сонячних електростанцій. Проте найбільшим об'єктом гірничодобувної діяльності залишається гідровідвал, що охоплює 626,6 га[22]. Ця територія входить до Чолгинського орнітологічного заказника. Великі за площею об'єкти присутні в районі двох інших кар'єрів – гідровідвал і хвостосховища Роздільського ДГХП «Сірка» загальною площею 763,9 га та відвали Подорожненського рудника – 523,9 га. Загалом, на всі об'єкти, що пов'язані з видобуванням і збагаченням самородної сірки, припадає 84,1% загальної площі аналогічних об'єктів у регіоні. Максимальне перевищення об'єктів у районах розроблення сірчаної руди коливається від 4 до 40 м.

---

[19] Профіль Львівської області. Аналітично-описова частина до Стратегії розвитку Львівської області. Львів, 2013. 102 с.

[20] Довкілля Львівської області – 2018 : статистичний збірник / Головне управління статистики у Львівській області ; відп. за випуск Л. Шалай. Львів, 2019. 116 с.

[21] Іванов Є. Геокадастрові дослідження гірничопромислових територій : монографія. Львів : ВЦ ЛНУ ім. Івана Франка, 2009. 372 с.

[22] Баклан Ф., Бент О., Каляєва С., Яцун В. Екологічні проблеми використання промислових відходів у західних областях України. *Геологія і геохімія горючих копалин*. 1994. № № 1–2 (86–87). С. 127–129.

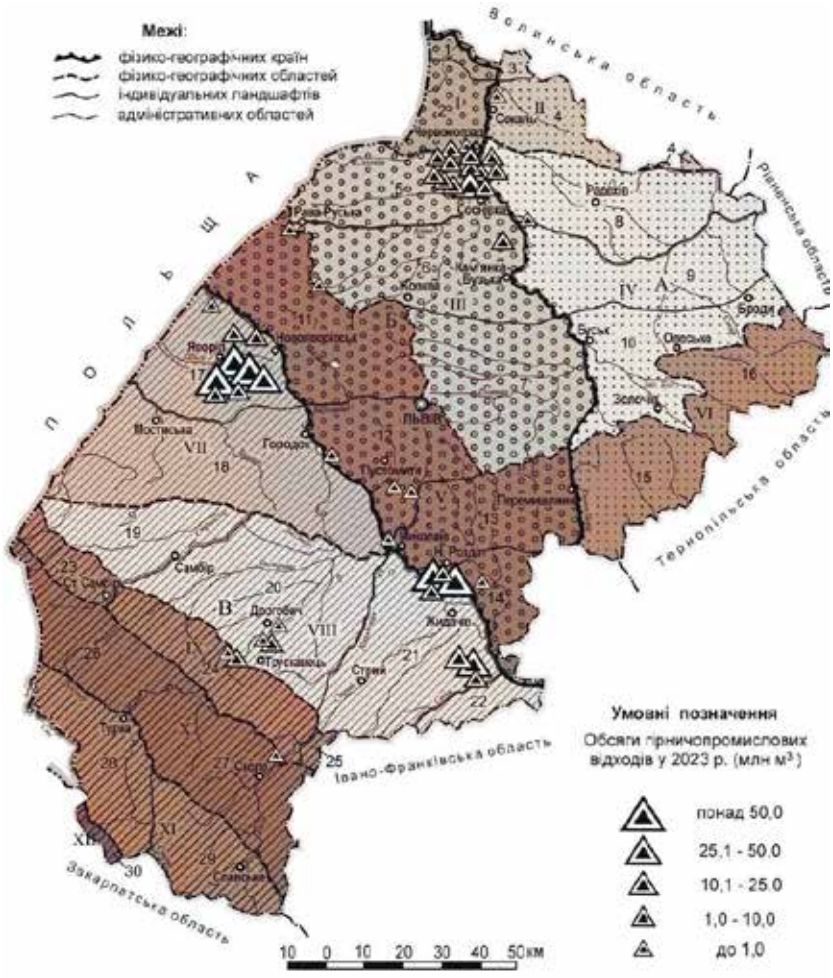


Рис. 1. Сховища гірничопромислових відходів у Львівській області

Фізико-географічні країни: А. Східноєвропейська рівнина; Б. Західноєвропейська рівнина; В. Східні (Українські) Карпати.

Фізико-географічні області: I. Люблінська височина; II. Волинська височина; III. Бузьке Мале Полісся; IV. Стирське Мале Полісся; V. Розточчя та Опілля; VI. Західно-Подільська височина; VII. Сянське Передкарпаття; VIII. Дністровське Передкарпаття; IX. Бескидське крайове низькогір'я;

X. Бескидське скибове низько- і середньогір'я; XI. Стрийсько-Сянська верховина; XII. Полонинське середньогір'я.

Фізико-географічні райони (ландшафти)[23]*:* 1. Грубешівське міжпасмове полісся; 2. Сокальське пасмо; 3. Іваницьке міжпасмове полісся; 4. Тартаківське пасмо; 5. Ратинське полісся; 6. Желдецьке полісся; 7. Пасмове (Грядове) побужжя; 8. Радехівське окраїнне полісся; 9. Бузько-Бродівське полісся; 10. Підподільське окраїнне полісся; 11. Равське Розточчя; 12. Львівське опілля; 13. Бібрське горбогір'я; 14. Ходорівське Опілля; 15. Бережанське горбогір'я; 16. Вороняцьке горбогір'я; 17. Яворівське полісся; 18. Сянсько-Дністровське опілля; 19. Стривігор-Болозівське передгір'я; 20. Дрогобицьке передгір'я; 21. Стрийське передгір'я; 22. Присвіцьке горбогір'я; 23. Добромильське низькогір'я; 24. Орівське низькогір'я; 25. Болехівське низькогір'я; 26. Верхньодністровське низькогір'я; 27. Сколівське середньогір'я; 28. Турківська верховина; 29. Славська верховина; 30. Буківська полонина.

Під час створення водойм у межах кар'єрів ці гірничопромислові об'єкти зазвичай затоплюються. Відсутність гідроізолюючого екрана на них дозволяє сірководню та іншим забруднювачам проникати в новостворені водні екосистеми. Окрім внутрішніх сховищ відходів, пов'язаних з видобутком і збагаченням самородної сірки, поблизу кар'єрів є нерекультивовані зовнішні відвали, гідровідвали, хвостосховища й акумуляційні ставки-накопичувачі.

Львівсько-Волинський кам'яновугільний басейн. Тема стану накопичення відходів у Червоноградському гірничопромисловому районі Львівсько-Волинського кам'яновугільного басейну є складною і багатогранною, такою, що потребує переосмислення обсягів відходів. Варто зазначити, що в 1990–2000-их роках були значні відмінності в показниках териконів, відвалів і хвостосховищ у даних, наданих ДП «Львіввугілля». Проте нині така інформація відсутня через закриття більшості вугільних підприємств, які вже не подають статистичних даних щодо накопичених відходів. Попри ліквідацію шахт, обсяги відходів зменшуються завдяки використанню перегорілої породи в дорожньому будівництві та виробництві шлакоблоків. Подібна ситуація спостерігається з ПАТ «Львівська вугільна компанія», підприємством-банкрутом, яке продовжує неконтрольовано розробляти відходи вуглезбагачення у хвостосховищах[24].

[23] Іванов Є. Ландшафти гірничопромислових територій : монографія. Львів : ВЦ ЛНУ ім. І. Франка, 2007. 334 с.

[24] Іванов Є., Ковальчук І. Накопичення гірничопромислових відходів у Львівсько-Волинському кам'яновугільному басейні: сучасний стан, проблеми і перспективи поводження. *Український журнал природничих наук*. 2024. № 7. С. 75–84.

Виявлено загальне скорочення площ, зайнятих під відвалами та хвостосховищами. Це можна пояснити точнішим визначенням площ за допомогою супутникових знімків, а також неврахуванням старих складів вугілля і породи, які тепер здебільшого порожні. Середня площа шахтного відвалу в Червоноградському ГПР становить 7,79 га. Найбільші площі для відходів відведені на шахтах «Межирічанська» (28,57 га), «Відродження» (24,39 га) і № 5 «Великомостівська» (23,04 га). Очікувано, найбільші площі характерні для гравітаційного відвалу (86,38 га) та хвостосховищ № 1 (71,23 га) і № 2 (63,13 га) ПАТ «Львівська вугільна компанія». Скорочення площ під відвалами зумовлене розбиранням перегорілих порід для різних господарських потреб. Найактивніше процеси вилучення породи відбуваються на відвалах шахт «Великомостівська» та «Бендюзька», які мають належні під'їзні шляхи й розташовані неподалік від споживачів мінеральної сировини. Зменшенню площ відвалів також сприяють рекультиваційні роботи на закритих вугільних шахтах.

Максимальне перевищення гірничопромислових об'єктів над рівнем навколишньої земної поверхні може значно варіюватися і впливає на розрахунок обсягів відходів. Найвищий відвал належить ПАТ «Львівська вугільна компанія» і досягає 64 м. Серед вугільних підприємств найбільші висоти спостерігаються на шахтах «Надія» (37 м), «Візейська» (33 м), «Червоноградська» (30 м). Середня відносна висота відвалів у Червоноградському ГПР становить 20,9 м.

Незважаючи на закриття більшості вугільних шахт у регіоні, спостерігається значне зростання обсягів накопичених відходів: з 96,22 млн м^3 у 2007 році до 122,05 млн м^3. Це збільшення насамперед пов'язано з активнішим накопиченням відходів від вуглезбагачення ПАТ «Львівська вугільна компанія», що додає 24,36 млн м^3, або 94,3% від загального приросту. У результаті проведеного аналізу ситуації на шахтах, що діють, як-от «Червоноградська» (збільшення на 2,01 млн м^3), «Надія» (на 1,58 млн м^3) та «Відродження» (на 0,44 млн м^3), стає очевидним, що основний ріст відходів припадає саме на них[25]. Водночас обсяги відходів на закритих шахтах демонструють тенденцію до зменшення.

У 1960–1980-х роках старі породні відвали часто зазнавали пожеж, що призводило до кристалізації гірських порід. Сильне фізичне вивітрювання спричинило формування численних кам'янистих метаморфізованих утворень заввишки від 10 до 25 метрів. У складі кам'яного вугілля і промислових відходів, що піднімаються на поверхню під час видобутку, виявлено понад 70 хімічних елементів, концентрація яких зазвичай

[25] Регіональний план управління відходами у Львівській області до 2034 року / Львівська ОДА; ТОВ «Компанія «Центр ЛТД»». Львів, 2025. 475 с. URL: https://loda.gov.ua/documents/156928

становить до 0,1%. Відходи містять пірит, що швидко окислюється і призводить до утворення сірчаної кислоти. Це знижує показник pH водних розчинів та інфільтратів до рівня 2,0–3,5.

Загалом, як перегорілі, так і свіжі (негорілі) породи є суттєвими накопичувачами хімічних елементів, що призводить до аномалій на поверхні відвалів. Середній вміст багатьох елементів, як-от цинк, хром, кобальт і миш'як, перевищує ГДК у кілька разів, а міді й нікелю – відповідно у 32 та 12 разів. Максимальні рівні забруднення за більшістю шкідливих елементів можуть бути вищими за ГДК у 20–200 разів[26]. Делювіальні відклади, які здебільшого змиває з породних відвалів талий і дощовий стік, зумовлюють поховання сучасних ґрунтів. Тому угіддя, розміщені поблизу відвалів, вміщують засолені сульфатами горизонти на глибині понад 20–30 см. За таких умов розвиток трав'яної рослинності стає неможливим, а її відсутність є індикатором значного вмісту токсичних елементів та їхніх сполук поблизу териконів. Площі, зайняті пошкодженою або знищеною рослинністю внаслідок впливу відвалів шахт, є значними і перевищують площу териконів у три-п'ять разів.

Інші райони накопичення гірничопромислових відходів. У результаті спалювання кам'яного вугілля на Добротвірській ТЕС щорічно утворюється приблизно 70 тис. т золошлакових відходів. Ці відходи енергетичної галузі зберігаються у трьох накопичувачах, розташованих біля теплової електростанції. На площі 200 га накопичено понад 6,5 млн т[27].

Відходи гірничо-хімічної галузі переважно складаються із глинисто-сольових хвостів Стебницького ДГХП «Полімінерал», нафтових шламів і кислих гудронів АТ «НПК Галичина», а також гірничих порід Бориславського підприємства з видобутку озокериту. Обсяг накопичених відходів на цих підприємствах, розташованих на площі понад 191,8 га, становить 16,36 млн м^3.

Під час видобування цементної та іншої будівельної сировини утворюється незначна кількість відходів. За умов середньорічного видобутку будівельної сировини, що становить до 2,5 млн м^3, на відвалах площею приблизно 92 га накопичено 5,9 млн м^3 некондиційних матеріалів.

Велика частина гірничопромислових відходів України акумульована на таких об'єктах, як відвали та хвостосховища ПАТ «Львівська вугільна компанія», де зосереджено приблизно 75 млн т гірничої породи та відходів флотації. До цього додаються породні відвали шахт ДП

[26] Іванов Є. Ландшафти гірничопромислових територій : монографія. Львів : ВЦ ЛНУ ім. І. Франка, 2007. 334 с.

[27] Іванов Є. Геокадастрові дослідження гірничопромислових територій : монографія. Львів : ВЦ ЛНУ імені Івана Франка, 2009. 372 с.

«Львіввугілля» з більш ніж 36 млн т гірничої породи. Також значні обсяги відходів зберігаються в накопичувачах Роздільського ДГХП «Сірка» із 4 млн т фосфогіпсів, у Стебницькому ДГХП «Полімінерал», де міститься 3,8 млн т шламів і хвостів збагачувальної фабрики, та в АТ «НПК Галичина», де понад 39 тис. т нафтошламів, змішаних з кислими гудронами.

У Львівській області об'єкти складування гірничопромислових відходів демонструють помітну різноманітність за площею та обсягами (див. рис. 1). Сховища таких відходів розташовані в усіх ландшафтах Розточчя і Опілля, у чотирьох передкарпатських районах, трьох малополіських, а також по одному в Бескидському крайовому низькогір'ї та на Люблінській височині[28]. Під час видобутку самородної сірки в Яворівському Поліссі, Ходорівському Опіллі та Стрийському передгір'ї, зокрема в районах Новояворівського та Роздільського ДГХП «Сірка», накопичилися значні обсяги відходів, що перевищують 200 млн т. Ще понад 10 млн т відходів зосереджено на території Ратинського та Радехівського Полісся, Львівського Опілля і Дрогобицького передгір'я[29]. Найбільші обсяги гірничопромислових відходів сконцентровані поблизу міст, що є центрами видобувної промисловості: Новояворівська, Нового Роздолу, Червонограда, Соснівки, Стебника, Дрогобича, Миколаєва та Борислава. У цих локаціях питоме навантаження від видобутку копалин становить від 500 до 1 000 т на особу, що створює серйозну екологічну загрозу для 350 тисяч жителів регіону (12,7% населення регіону). Полігони промислових відходів є серйозними чинниками забруднення довкілля та вважаються потенційними осередками екологічних катастроф. Варто нагадати про масштабне засолення ґрунтів, поверхневих і підземних вод у вересні 1983 року, спричинене аварією на хвостосховищі Стебницького ДГХП «Полімінерал», коли у водні об'єкти басейну Дністра потрапило понад 5 млн м^3 розсолів.

3. Ефективність використання гірничопромислових відходів

У сучасних умовах надзвичайно гострою стала проблема комплексного використання відходів гірничого виробництва. До них належать розкривні породи, за відкритого способу видобутку, відвали, за підземного освоєння родовищ, а також бідні та важкозбагачувальні руди, хвости збагачення, шлаки, шлами, золи тощо. На жаль, у господарстві нині

[28] Іванов Є., Ковальчук І. Накопичення гірничопромислових відходів у Львівсько-Волинському кам'яновугільному басейні: сучасний стан, проблеми і перспективи поводження. *Український журнал природничих наук*. 2024. № 7. С. 75–84.

[29] Іванов Є. Ландшафти гірничопромислових територій : монографія. Львів : ВЦ ЛНУ ім. І. Франка, 2007. 334 с.

переробляється лише 2–4% таких відходів, хоча більшість із них є цінною сировиною для виробництва різноманітних будівельних матеріалів[30]. На Львівщині накопичено значні обсяги промислових відходів, які майже не використовуються як цінна сировина. Водночас поруч із відвалами діють спеціалізовані кар'єри з видобутку будівельних матеріалів. Собівартість виробництва щебеню, піску та гравію з відвальних порід вугільних підприємств у два-чотири рази нижча, ніж на профільних будівельних виробництвах.

Накопичення великих мас гірничопромислових відходів у межах регіону спричинене нераціональним залученням окремих корисних компонентів. Натомість у разі комплексного використання мінеральної сировини обсяг накопичених відходів скоротиться майже вдвічі. Використання мінеральних ресурсів таким чином сприяє нарощуванню обсягів промислової сировини, що є надзвичайно вагомим з економічного погляду. Водночас, за умов масштабного видобування корисних копалин у надрах, сформувалися значні порожнечі, тобто вироблені гірничі простори; їх раціональне застосування набуває першочергового значення як практична господарська проблема. Отриманий досвід у сфері спорудження газосховищ, будівництва лікарень, організації захована небезпечних речовин, а також розміщення допоміжних або навіть основних виробництв (зокрема, підземних заводів) є недостатнім порівняно з уже наявними можливостями. Для більш повного залучення мінеральних ресурсів необхідно запроваджувати новітні ресурсозберігувальні технології та обладнання. Важливим кроком стане помітне зменшення матеріало- й енергомісткості гірничодобувної та гірничозбагачувальної промисловості, що, у свою чергу, сприятиме зниженню собівартості мінеральних ресурсів і кінцевої продукції. Для цього до гірничої діяльності доцільно залучати іноземні інвестиції та технологічні розробки.

Розглянемо зазначене на прикладі найбільш перспективного Червоноградського ГПР. Параметри мінерального та хімічного складу породи, накопиченої в териконах, відвалах і хвостосховищах, чинять вплив як на стан довкілля, так і на здоров'я населення району. Це зумовлено тим, що мікроелементи, які акумулюються у відвалах і перевищують ГДК, формують сполуки, здатні спричиняти отруєння рослин, тварин і людей. З огляду на кризову геоекологічну ситуацію в Червоноградському ГПР та відсутність у 1990-их роках додаткових площ для розміщення вуглевідходів ПАТ «Львівська вугільна компанія», постала необхідність

[30] Іванов Є. А., Біланюк В. І. Ефективність використання мінеральної сировини і гірничопромислових відходів в Україні. *Надрокористування в Україні. Перспективи інвестування*: матер. 2-ї міжнарод. наук.-практ. конф. К. : ДКЗ, 2015. С. 344–351.

здійснити вилучення мулів із переповнених хвостосховищ і повернути їх у повторну експлуатацію. У 1999 році було ініційовано розроблення відходів вуглезбагачення, і цей процес з урахуванням різної інтенсивності триває донині. Водночас способи вилучення сировини різняться: на хвостосховищі № 1 роботи виконуються екскаваторами й автотранспортом, а на хвостосховищі № 2 застосовується земснаряд із подальшою подачею брандспойтами[31]. Цей захід дозволив повну або часткову рекультивацію територій хвостосховищ і продовження функціонування підприємства. У 2015 році було припинено перероблення та відвантаження вугільної продукції, а також ініційовано процедуру банкрутства ПАТ «Львівська вугільна компанія». Проте видобуток та реалізація промислових відходів підприємства тривали, демонстрували значну активізацію останніми роками. Обсяги вугільних шламів, акумульованих у хвостосховищах, є достатніми для забезпечення економічної діяльності залучених осіб і організацій протягом 10–15 років, навіть після остаточної зупинки роботи фабрики. У 2019 році були здійснені спроби відновити функціонування компанії шляхом імпорту російського вугілля, призначеного для зниження зольності високозольного вугілля Донбаського та Львівсько-Волинського басейнів. Ця, як і інша, незаконна схема, мала на меті дестабілізацію вугільної галузі басейну, водночас надавала економічну підтримку приватним енергетичним компаніям і країні-агресорці.

Застосування застарілих і неефективних методів зберігання, переробки та перевезення гірничих відходів у Червоноградському ГПР, занизький рівень екологічного контролю, а також незадовільне виконання заходів з відновлення земель сприяють значним змінам і забрудненню довкілля навколо териконів, відвалів і хвостосховищ. Загалом, економічна вигода від усебічного використання відходів у цьому регіоні може бути досягнута різними шляхами. Насамперед це паралельне видобування цінних елементів (як-от германій), що містяться в матеріалах цих відвалів і хвостосховищ. Ці об'єкти гірничодобувної промисловості є, по суті, штучними покладами цінних мінералів. Відходи збагачення вугілля, що зберігаються у хвостосховищах, придатні для спалювання в котельних установках теплових електростанцій[32]. Проте відходи гірничого виробництва переважно використовують для виготовлення будівельних матеріалів або для

[31] Іванов Є., Ковальчук І. Накопичення гірничопромислових відходів у Львівсько-Волинському кам'яновугільному басейні: сучасний стан, проблеми і перспективи поводження. *Український журнал природничих наук*. 2024. № 7. С. 75–84.

[32] Іванов Є., Ковальчук І. Геоекологічні проблеми, пов'язані з використанням відходів гірничопромислових територій як енергетичного ресурсу. *Регіональні географічні дослідження України та суміжних територій :* збірник наукових праць. Луганськ : Альма-матер, 2006. С. 27–29.

облаштування основ доріг, дамб і засипки підтоплених територій. Останні два напрями застосування вже мають успішний досвід упровадження, тоді як щодо першого напряму дискусії періодично поновлюються, уже існують відповідні проєкти для його майбутньої реалізації[33].

Упровадження енергоощадних і ресурсозбережувальних технологій у процеси видобутку й переробки вугілля сприятиме покращенню екологічної ситуації в Україні. Сучасні методи швидко окупаються та дозволяють отримати більший обсяг готового продукту з однієї одиниці вихідної мінеральної сировини. Водночас собівартість продукції, отриманої з відходів гірничої галузі, значно нижча, ніж у товарів, виготовлених із сировини, добутої звичайними способами. Отже, питання ефективного використання мінеральних запасів вирішуються через застосування сучасних безвідходних технологій видобутку вугілля.

Умови зберігання та утилізації відходів зазвичай не відповідають сучасним санітарно-гігієнічним нормам, що призводить до забруднення поверхневих, ґрунтових і підземних вод, ґрунтів і атмосферного повітря. Ця ситуація зумовлена тим, що об'єкти для зберігання відходів були закладені ще в радянський період, а також відсутністю належної інфраструктури та відповідного фінансування для забезпечення ефективного поводження з ними.

Проблема поводження з відходами гірничодобувної промисловості вийшла за рамки суто економічних і екологічних питань, набувши значного соціально-демографічного впливу. Це особливо актуально для густонаселених районів Львівської області, де антропогенний тиск становить до 10–12 млн т на квадратний кілометр. Таке високе навантаження є нетиповим для більшості країн світу, оскільки там відходи гірничої промисловості зазвичай переробляють або застосовують для заповнення відпрацьованих шахтних виробіток чи вирівнювання ландшафту. У результаті розрахунку накопиченого обсягу відходів на одного жителя отримуємо значні показники (до 3–5 тис. т на людину). Це прямо пов'язано зі зростанням захворюваності (зокрема, серцево-судинних, легеневих, шлунково-кишкових, алергічних хвороб), зниженням рівня народжуваності та підвищенням смертності серед населення.

Актуальна екологічна ситуація у Львівській області зумовлена тривалим накопиченням відходів гірничодобувної промисловості. Це спричиняє забруднення повітря, поверхневих, ґрунтових і підземних вод, ґрунтового та рослинного шарів, а також підвищує рівень захворюваності

[33] Регіональний план управління відходами у Львівській області до 2034 року / Львівська ОДА ; ТОВ «Компанія «Центр ЛТД»». Львів, 2025. 475 с. URL: https://loda.gov.ua/documents/156928

серед місцевих мешканців. Визначено потенційні напрями ефективного застосування гірничопромислових відходів на найближчу перспективу, які включають: попутне вилучення цінних елементів (наприклад, германію), спалювання вуглемісткої сировини в котлах теплових електростанцій, виробництво будівельних матеріалів, а також використання для формування основ автошляхів, гребель та засипки підтоплених територій.

Щоб ефективно використовувати відходи гірничої промисловості, потрібен точніший облік їхніх запасів за допомогою геоінформаційних технологій. Нашою командою створено наукові підходи та методику для аналізу й моделювання екологічного стану територій, пов'язаних з гірничодобувною галуззю[34], а також накопичено досвід застосування ГІС-технологій у сфері поводження з відходами[35].

ВИСНОВКИ

Пропонуємо на розгляд такі головні висновки:

1. Дослідження первинних даних Департаменту екології і природного середовища Львівської ОД(В)А за 2022–2024 роки дало змогу визначити різновиди гірничопромислових відходів, наявних у Львівській області. Понад 37,0% від сукупного обсягу відходів, що утворилися у 2024 році, становили відходи гірничодобувної промисловості.

2. Накопичення та використання гірничопромислових відходів (розкривних порід, хвостів збагачення, шламів і шахтних вод) є джерелом масштабного антропогенного навантаження на природне середовище. Ці відходи становлять понад 75% від загального обсягу промислового сміття, утворюють величезні техногенні родовища. Тривале зберігання відходів у териконах, відвалах, хвостосховищах, відстійниках спричинює виникнення та розвиток небезпечних деструктивних процесів.

3. Протягом 1990-их років у сховищах гірничопромислових відходів, як-от відвали, терикони, відстійники та хвостосховища, було зібрано понад 1 млрд м^3 промислових відходів. З них 83,6 млн т становили високотоксичні

[34] Іванов Є., Ковальчук І., Андрейчук Ю. Теоретико-методологічні основи й методика геоекологічного картографування і моделювання гірничопромислових геокомплексів. *Науковий вісник Волинського державного університету імені Лесі Українки. Географічні науки*. 2006. № 2. С. 15–23 ; Ковальчук І., Іванов Є., Андрейчук Ю. Моделювання стану природно-антропогенних систем з використанням ГІС-технологій. *Геодезія, картографія і аерофотознімання*. 2004. Вип. 65. С. 105–110 ; Ковальчук І., Іванов Є., Клюйник В. Картографування геоекологічного стану природно-господарських систем гірничо-промислових територій. *Часопис картографії*. 2011. Вип. 2. С. 129–137.

[35] Андрейчук Ю., Іванов Є., Книш І. Геоінформаційні технології в управлінні відходами вугільної промисловості. *Геоінформаційні технології у територіальному управлінні :* матеріали ІІІ Міжнародної науково-практичної конференції. Одеса : ОРІДУ НАДУ, 2016. С. 6–9 ; Іванов Є., Андрейчук Ю., Лобанська Н. Проблеми геоінформаційного моделювання гірничопромислових геосистем. *Фізична географія та геоморфологія*. 2005. Вип. 48. С. 180–186.

(або надзвичайно небезпечні) речовини. Унаслідок затоплення великих сірчаних кар'єрів у регіоні загальний обсяг цих відходів істотно зменшився і натепер, за останніми оцінками, становить 582,04 млн м^3. Водночас територія, зайнята гірничопромисловими відходами, становить приблизно 44,2 км^2, що відповідає 0,2% загальної площі регіону. Більшість відходів, що утворилися на території Львівської області (99,9% загального обсягу), належить до IV класу небезпеки. Обсяг відходів I класу становить 40 т, II класу – 503 т, а III класу – 2 102 т.

4. Значні обсяги промислових відходів зосереджено на об'єктах підприємств:

– ПАТ «Львівська вугільна компанія» зберігає у відвалах і хвостосховищах приблизно 75 млн т гірської породи та відходів флотації (збагачення);

– на шахтах ДП «Львіввугілля» у териконах накопичено понад 36 млн т гірської породи;

– у накопичувачах Роздільського ДГХП «Сірка» міститься 4,0 млн т фосфогіпсів;

– Стебницьке ДГХП «Полімінерал» має 3,8 млн т шламів і відходів збагачувальної фабрики;

– на АТ «НПК Галичина» міститься понад 39 тис. т нафтових шламів, що змішані з кислими гудронами.

5. Визначено потенціал раціонального використання відходів гірничої промисловості у Львівській області, який може бути реалізований за різними напрямами, як-от: супутній видобуток цінних компонентів, застосування вуглемістких відходів як палива на теплових електростанціях, виробництво будівельних матеріалів, а також формування основи автомобільних доріг, гребель і заболочених територій, інше.

АНОТАЦІЯ

Процеси видобутку та переробки різних корисних копалин на Львівщині (зокрема, вугілля, сірки та калійної солі) спричинили утворення значних обсягів відходів гірничої промисловості, які водночас є цінною вторинною сировиною. Було досліджено низку актуальних екологічних проблем, зумовлених нагромадженням і можливостями застосування цих відходів у регіоні. У 1990-их роках обсяг гірничопромислових відходів у місцях їх зберігання перевищував 1 млрд м^3, 83,6 млн т з них становили високотоксичні речовини. Натепер ці обсяги значно скоротилися і становлять 582,04 млн м^3. Загальна площа, зайнята цими сховищами, досягає 44,2 км^2. Найбільші накопичення цих відходів містяться на відвалах і у хвостосховищах таких підприємств, як ПАТ «Львівська вугільна

компанія», ДП «Львіввугілля», Новояворівське і Роздільське ДГХП «Сірка», Стебницьке ДГХП «Полімінерал», а також АТ «НПК Галичина». Були розглянуті можливості ефективного та комплексного застосування гірничопромислових відходів у Львівській області. Це включає їх використання як цінних супутніх компонентів, будівельних матеріалів, а також для формування основи автомобільних доріг, будівництва дамб і засипання підтоплених територій.

Література

1. Андрейчук Ю., Іванов Є., Книш І. Геоінформаційні технології в управлінні відходами вугільної промисловості. *Геоінформаційні технології у територіальному управлінні :* матеріали ІІІ Міжнародної науково-практичної конференції. Одеса : ОРІДУ НАДУ, 2016. С. 6–9.
2. Баклан Ф., Бент О., Каляєва С., Яцун В. Екологічні проблеми використання промислових відходів у західних областях України. *Геологія і геохімія горючих копалин*. 1994. № № 1–2 (86–87). С. 127–129.
3. Войтків П., Іванов Є., Наконечний Ю., Ваньо Н. Поводження з відходами у Львівській області: технології та стале управління. *Слобожанський науковий вісник.* Серія «Природничі науки». 2026. № 1. С. 155–162. DOI: 10.32782/naturalspu/2026.1.19
4. Довкілля Львівської області – 2018 : статистичний збірник / Головне управління статистики у Львівській області ; відп. за випуск Л. Шалай. Львів, 2019. 116 с.
5. Довкілля Львівської області. Статистичні дані 2022–2024 років. *Аналітичний портал SaveEcoBot.* URL: https://www.saveecobot.com/state-of-the-environment/lvivska-oblast
6. Екологічний паспорт Львівської області за 2019 рік / Департамент екології та природних ресурсів Львівської ОДА. Львів, 2020. 265 с.
7. Екологічний паспорт Львівської області за 2024 рік / Департамент екології та природних ресурсів Львівської ОДА. Львів, 2025. 214 с. URL: https://deplv.gov.ua/ekologichnyj-pasport/
8. Іванов Є. Геокадастрові дослідження гірничопромислових територій : монографія. Львів : ВЦ ЛНУ ім. Івана Франка, 2009. 372 с.
9. Іванов Є. Ландшафти гірничопромислових територій : монографія. Львів : ВЦ ЛНУ ім. І. Франка, 2007. 334 с.
10. Іванов Є. Накопичення і використання гірничопромислових відходів у Львівській області: актуальні екологічні проблеми і шляхи їх вирішення. *Розроблення та реалізація регіональних Програм поводження з відходами: проблемні питання та кращі практики :* збірник матеріалів. Київ : Центр екологічної освіти та інформації, 2020. С. 77–81.

11. Іванов Є. Природно-господарські системи гірничопромислових територій Західного регіону України: функціонування, моделювання, оптимізація : автореф. дис. … докт. геогр. наук. Київ : ФОП Корпан Б. І., 2017. 40 с.

12. Іванов Є. Спектр геоекологічних проблем накопичення промислових відходів у Львівській області. *Вітчизняна наука на зламі епох: проблеми та перспективи розвитку :* матеріали 57-ої Всеукраїнської науково-практичної інтернет-конференції. Переяслав-Хмельницький, 2020. Вип. 57. С. 7–10.

13. Іванов Є., Андрейчук Ю., Лобанська Н. Проблеми геоінформаційного моделювання гірничопромислових геосистем. *Фізична географія та геоморфологія*. 2005. Вип. 48. С. 180–186.

14. Іванов Є., Біланюк В. Ефективність використання мінеральної сировини і гірничопромислових відходів в Україні. *Надрокористування в Україні. Перспективи інвестування :* матеріали 2-ї Міжнародної науково-практичної конференції. Київ : ДКЗ, 2015. С. 344–351.

15. Іванов Є., Ковальчук І. Геоекологічні проблеми, пов'язані з використанням відходів гірничопромислових територій як енергетичного ресурсу. *Регіональні географічні дослідження України та суміжних територій :* збірник наукових праць. Луганськ : Альма-матер, 2006. С. 27–29.

16. Іванов Є., Ковальчук І. Накопичення гірничопромислових відходів у Львівсько-Волинському кам'яновугільному басейні: сучасний стан, проблеми і перспективи поводження. *Український журнал природничих наук*. 2024. № 7. С. 75–84.

17. Іванов Є., Ковальчук І., Андрейчук Ю. Теоретико-методологічні основи й методика геоекологічного картографування і моделювання гірничопромислових геокомплексів. *Науковий вісник Волинського державного університету імені Лесі Українки. Географічні науки*. 2006. № 2. С. 15–23.

18. Ковальчук І., Іванов Є., Андрейчук Ю. Моделювання стану природно-антропогенних систем з використанням ГІС-технологій. *Геодезія, картографія і аерофотознімання*. 2004. Вип. 65. С. 105–110.

19. Ковальчук І., Іванов Є., Клюйник В. Картографування геоекологічного стану природно-господарських систем гірничо-промислових територій. *Часопис картографії*. 2011. Вип. 2. С. 129–137.

20. Профіль Львівської області. Аналітично-описова частина до Стратегії розвитку Львівської області. Львів, 2013. 102 с.

21. Регіональний план управління відходами у Львівській області до 2034 року / Львівська ОДА ; ТОВ «Компанія «Центр ЛТД»». Львів, 2025. 475 с. URL: https://loda.gov.ua/documents/156928

22. Рудько Г., Іванов Є., Ковальчук І. Гірничопромислові геосистеми Західного регіону України : монографія. Київ ; Чернівці : Букрек, 2019. Т. 1. 464 с.

23. Сивий М., Паранько І., Іванов Є. Географія мінеральних ресурсів України : монографія. Львів : Простір М, 2013. 684 с.

24. Стратегія розвитку Львівської області на період 2021–2027 років. Львів, 2019. 123 с. URL: https://loda.gov.ua/documents/49999

Information about the authors:

Ivanov Yevhen,
Doctor of Geographical Sciences, Professor,
Head of the Department of Constructive Geography and Cartography
Ivan Franko National University of Lviv
41, Doroshenko Street, Lviv, Ukraine

Voitkiv Petro,
Candidate of Geographical Sciences,
Associate Professor at the Department
of Constructive Geography and Cartography
Ivan Franko National University of Lviv
41, Doroshenko Street, Lviv, Ukraine

Kornus Anatolii,
Candidate of |Geographical Sciences,
Associate Professor at the Department of General and Regional Geography
Sumy State Pedagogical University named after A. S. Makarenko
87, Romenska Street, Sumy, Ukraine;
Associate Professor at the Department of Geography of Ukraine,
Soil Science and Land Cadastre
Odesa I. I. Mechnikov National University
2, Zmiienka Vsevoloda Street, Odesa, Ukraine

CHAPTER 32

THE SUBJECTIVE DIMENSION OF FINANCIAL SUSTAINABILITY AND QUALITY OF LIFE IN THE COMMUNITIES OF CHERNIVTSI OBLAST (SURVEY RESULTS)

Kurysh Taras
DOI https://doi.org/10.30525/978-9934-26-714-7-32

INTRODUCTION

Amid the reform of the administrative-territorial system, the current challenges of martial law, and the socio-economic transformations under way in Ukraine, ensuring the financial sustainability of territorial communities is acquiring strategic significance. The financial sustainability of local self-government is the foundation of the state's economic security, since it is this factor that determines the overall quality of life of the population. In this context, it is critically important to study the development of every region of Ukraine, regardless of the specifics of its spatial and economic potential.

Such research is of particular relevance for Chernivtsi Oblast. It is the smallest region in Ukraine by area and comprises three administrative districts, within which 52 territorial communities operate, characterized by considerable differentiation of spatial and socio-economic development conditions. The region has unique features in the way its socio-economic processes unfold, determined by its specific border status and direct neighborhood with Romania and Moldova. The communities of Chernivtsi Oblast function under diverse physical-geographic and socio-geographic conditions, which affects the labor market, including the structure of employment, where labor migration, private cross-border transfers, and a high share of self-employment traditionally play a significant role. At the same time, the current challenges of martial law have placed a considerable burden on local budgets and the social infrastructure of communities, in particular through the integration of internally displaced persons and the relocation of businesses from temporarily occupied territories[1]. Taken

[1] Куриш Т. Формування фінансових ресурсів територіальних громад Чернівецької області в умовах суспільних викликів. *Науковий вісник Чернівецького університету: Географія.* 2024. Вип. 849. С. 106–113. DOI: 10.31861/geo.2024.849.106-113

together, these factors form deep spatial disparities in the population's level of well-being, which underscores the need for an in-depth analysis of the financial sustainability of the region's communities not only through the lens of budgetary indicators, but also through the direct subjective dimension of the local population's quality of life.

Official state statistics often fail to capture the population's real sentiments and subjective perception of financial strategies. This gives rise to an acute need for primary sociological and questionnaire-based research. It is precisely this dimension that makes it possible to assess people's actual quality of life "from within", identify critical pain points (risks of over-indebtedness, lack of savings, declining purchasing power), and determine which socio-economic factors are decisive for the financial survival and development of the oblast's residents.

The results of such research are critically important for developing effective programs for the socio-economic development of Chernivtsi Oblast, optimizing local self-government policy, and forming targeted instruments to support the most vulnerable categories of citizens during the crisis period.

The purpose of the study is the theoretical substantiation and empirical assessment of the financial sustainability of the communities of Chernivtsi Oblast, based on an analysis of the subjective perception of quality of life and the material well-being of the local population, in order to develop strategic directions for enhancing the capacity of local self-government bodies under crisis conditions.

To achieve this goal, the following scientific and practical tasks were defined:

– to substantiate the theoretical and methodological foundations of the socio-geographic study of the financial sustainability of territorial communities in the context of assessing territorial differences in the population's quality of life;

– to identify the spatial features of the financial condition of households (income level, savings, debt burden) across different types of territorial communities of Chernivtsi Oblast, based on socio-geographic questionnaire surveys;

– to determine the key geospatial and socio-economic factors (in particular, border location, peripherality, and geomorphological conditions) that shape the territorial differentiation of the subjective perception of the region's population's quality of life;

– to develop scientifically grounded recommendations for optimizing the territorial organization and strengthening the financial and economic capacity of the communities of Chernivtsi Oblast, taking into account the identified socio-geographic needs of the population.

1. Methodology for Conducting a Subjective Study of Financial Sustainability and Quality of Life of the Region's Population

Under current conditions, as Ukraine continues to endure a protracted phase of full-scale hostilities, the financial condition of communities is affected by a complex of exogenous and endogenous factors whose degree and nature of impact are difficult to model predictively. These factors mostly have a destructive effect on the development trajectory of territories, their international and domestic competitiveness, the level of budgetary self-sufficiency, and the overall quality of living conditions for the population. That is precisely why it is critically important to conduct continuous monitoring of the financial condition and, above all, to assess the adaptive financial sustainability of communities as a basic indicator of their viability.

The financial sustainability of a territorial community is one of the components of its overall resilience and, in essence, a factor in preserving its financial well-being[2]. A number of studies by contemporary scholars are devoted to examining the types of resilience of territorial communities, including financial resilience, and to seeking ways to optimize regional policy as a basic component of an innovative model of strategic management of the socio-economic development of modern society.

The term "resilience" (or "sustainability") is a fundamental interdisciplinary category, characteristic not only of economic science but also of other disciplines – primarily the natural sciences, which deal with the study of the functioning of complex dynamic systems (biology, geography, physics, chemistry). Traditionally, sustainability is associated with orderliness, stability, and equilibrium. In natural-science discourse, this concept has been used to denote a system's ability to preserve its steady state or restore it (and also to transition to a new, progressive state) after a destructive factor that pushed it out of its initial equilibrium ceases to act.

In economic theory, sustainability is viewed through the lens of the concept of economic equilibrium, according to which achieving and maintaining balance within a system is one of the most important micro- and macroeconomic tasks. This concept implies that economic actors strive to move the system into an optimal equilibrium state, which in this context is directly equated with the concept of sustainability. The Dictionary of the Ukrainian Language defines "sustainability" as "the ability to withstand external influence, to resist something; to preserve and display

[2] Russell R., Kutin J., Marriner T. Financial capability research in Australia. RMIT University, School of Economics. *Finance & Marceting.* 2020. 86 p. URL: https://www.financialcapability.gov.au/sites/www.financialcapability.gov.au/files/2022-01/financial-capability-research-in-australia.pdf

one's properties for a long time, without succumbing to destruction, deterioration, etc."[3].

Key aspects of the legal framework for the resilience of territorial communities under martial law are thoroughly described in the works of a number of contemporary scholars, in particular V. Miklovda[4], S. Khrupovych and T. Podvirna[5]. In turn, M. Buryk defines financial sustainability as ensuring reserves of financing funds, the effective use of own and borrowed resources, the investment of capital in innovative activity, and stable financing of development[6]. According to N. Starostenko, financial sustainability is the ability of local self-government bodies to accumulate a volume of revenues sufficient to cover their expenditures and ensure a balanced budget throughout the budget year[7]. T. Korytko defines the concept of "financial sustainability" of a local budget as the state of budget revenues and expenditures, their structure and dynamics, which enable local authorities to fulfill their obligations fully, in a timely manner, and independently of other budget levels, and which promote the balanced development of the economy and the social sphere[8].

Given the above, it can be argued that local finances play the role of an active, formative component of the economic foundation of the capacity and financial sustainability of territorial communities.

A significant contribution to expanding this paradigm was made by M. Dziamulych[9], who in his works examines the financial sustainability of communities through the lens of smart development and the digital social economy. This approach makes it possible to comprehensively link budgetary capacity with the resilience of labor potential, the quality of managerial

---

[3] Словник української мови. / Академія наук Української РСР. Ін-т мов-ва ім. О. О. Потебні ; ред. : І. Назарова, О. Петровська, Л. Скрипник, Л. Юрчук. Київ : Наукова думка, 1978. Т. IX. 853 с.

[4] Мікловда В., Пітюлич М., Сембер С. Теоретичні підходи до формування механізму економічної координації діяльності об'єднаних територіальних громад. *Соціально-економічні проблеми сучасного періоду України.* 2018. Вип. 5. С. 59–63. URL: http://jnas.nbuv.gov.ua/article/UJRN-0000976658

[5] Хрупович С., Подвірна Т. Фінансова спроможність бюджетів об'єднаних територіальних громад. *Економіка і суспільство.* 2017. Вип. 13. С. 1259–1262. URL: https://economyandsociety.in.ua/journals/13_ukr/209.pdf

[6] Бурик М. Економічна та соціальна стійкість територіальних громад в умовах війни. *Інвестиції: практика та досвід.* 2024. № 12. URL: https://www.nayka.com.ua/index.php/investplan/article/view/3976/4011

[7] Старостенко Н. Методичні підходи до оцінки фінансової стійкості бюджету міста. *Актуальні проблеми економіки.* 2006. № 7. С. 38–47.

[8] Коритько Т. Методи оцінки фінансової стійкості місцевих бюджетів. *Економічний простір.* 2008. № 12(1). С. 140–145. URL: http://nbuv.gov.ua/portal/Soc_Gum/Ekpr/2008_ 12/1/ koritko.pdf

[9] Дзямулич М., Назарук А. Концепція смарт-розвитку територіальних громад в Україні. *Сучасні кризові явища в економіці та проблеми облікового, контрольного та аналітичного забезпечення управління підприємством :* матеріали XVI Міжнародної науково-практичної конференції, 25 травня 2024 р., Луцьк : ВІП ЛНТУ, 2024. С. 63–65. URL: https://lib.lntu.edu.ua/sites/default/files/2024-11/%D0%97%D0%B1%D1%96%D1%80%D0…

decisions, and the social stability of a territory, while focusing attention on its institutional and socio-economic components.

In the scholarly works of V. Kyrylenko, the resilience of the economy is defined as its ability to withstand conditions of armed confrontation, to ensure the reliable satisfaction of the military-economic needs of the armed forces and the needs of the national economy in the interest of achieving victory[10].

The economic essence of the financial sustainability of territorial communities lies in their ability to ensure the unimpeded performance of their public functions, to maintain the balance of budgetary flows, and to retain control over financial resources amid a sharp increase in uncertainty and shock loads[11]. Under martial law, financial sustainability acquires the character of adaptive capacity, manifested in the flexible reallocation of expenditures, the maintenance of a minimally necessary level of revenues, and the preservation of the solvency of local budgets, while economic indicators simultaneously decline.

The substantiation of the socio-economic and spatial factors of the financial sustainability and quality of life of the population of Chernivtsi Oblast is based on the use of empirical analysis methods, in particular a mass questionnaire survey. The use of primary sociological data makes it possible to identify subjective assessments of well-being, household adaptation strategies to crisis conditions, and hidden problems that are not fully reflected in official statistical reporting.

Object of the empirical analysis: private households and the permanent population of Chernivtsi Oblast aged 18 and over.

General population: the present population of Chernivtsi Oblast, including internally displaced persons (IDPs) who have integrated into local communities, and representatives of relocated businesses.

Sampling parameters: multistage, representative by sex, age, and type of settlement (urban/rural). A total of 1,681 respondents were surveyed. The marginal sampling error does not exceed 3.5% at a confidence level of 0.95.

Territorial segmentation: data collection was carried out across all three administrative districts of the oblast (Chernivtsi, Dnistrovskyi, Vyzhnytskyi), covering residents of 52 territorial communities. Particular attention in forming the survey array was given to differentiating communities by their

[10] Теорія і практика воєнної економіки : навчальний посібник / за ред. В. Кириленка. Київ : ВГІ НАОУ, 2001. Ч. 1. 190 с.

[11] Дзямулич М., Назарук А. Концепція смарт-розвитку територіальних громад в Україні. *Сучасні кризові явища в економіці та проблеми облікового, контрольного та аналітичного забезпечення управління підприємством :* матеріали XVI Міжнародної науково-практичної конференції, 25 травня 2024 р., Луцьк : ВІП ЛНТУ, 2024. С. 63–65. URL: https://lib.lntu.edu.ua/sites/default/files/2024-11/%D0%97%D0%B1%D1%96%D1%80%D0…

physical-geographic and spatial-economic conditions (mountainous, border, central, urban, and rural communities).

Primary data collection was carried out during June – July 2026 through self-completed online questionnaires (CAWI) using the Google Forms digital platform. The research instrument was an author-designed questionnaire containing three interrelated blocks of questions: the respondent's socio-demographic and territorial profile (territorial community, type of settlement, sex, age); a block assessing individual financial sustainability (sources of income and the family's material situation, the level of quality of life in the community through the lens of financial security); and a block providing an empirical measurement of quality of life and the community's institutional capacity (satisfaction with current living conditions, the development of local infrastructure, the processes of forming and allocating budget funds, as well as the identification of key destructive factors and potential opportunities for enhancing the overall financial capacity of the territorial community).

The MS Excel statistical analysis package was used to convert the collected survey data into scientific conclusions.

The mathematical and statistical processing of the data obtained included: descriptive analysis – calculation of frequency distributions and mean values for the initial cross-section of responses; cross-tabulation analysis (contingency tables) – to identify relationships between respondents' socio-economic status (for example, residing in a village, urban-type settlement, or city) and their level of financial sustainability; and the method of subjective scaling – the use of linear rating scales (for example, a 5-point Likert scale) to measure integral quality-of-life indicators across the region's 52 communities.

The methodological design of the study ensures a high degree of reliability of the results, which makes it possible to extrapolate the findings obtained to the overall population of Chernivtsi Oblast and to identify the most destructive factors affecting the financial stability of communities.

2. Empirical Analysis of the Financial Sustainability and Subjective Assessments of Quality of Life of the Population of Chernivtsi Oblast

Moving from the theoretical and methodological substantiation to a practical analysis of the financial sustainability of communities requires detailed processing of the array of primary socio-economic data. The results of the mass questionnaire survey, conducted during June – July 2026, make it possible to verify theoretical hypotheses and to reveal the population's actual state of well-being "from within". The logic of the empirical analysis is built on the principle of sequential unfolding: from forming a spatial-demographic portrait of the respondents to assessing the financial strategies of their households and

the perception of quality of life and the institutional capacity of local authorities among residents of the region's 52 territorial communities.

The effectiveness and representativeness of extrapolating the results of the empirical study to the overall population of Chernivtsi Oblast directly depend on the structural balance of the formed array of respondents. The first block of the author's instrument (socio-demographic and territorial profile) was aimed at recording the objective characteristics of respondents, which made it possible to group them by sex, age, type of settlement (urban/rural), as well as by spatial affiliation to specific territorial communities. Analysis of the spatial distribution of survey participants confirmed that the sample array proportionally covers residents of all three enlarged administrative units of Chernivtsi Oblast: Chernivtsi (33 territorial communities), Dnistrovskyi (10 territorial communities), and Vyzhnytskyi (9 territorial communities) districts.

Differentiating respondents by type of territorial community is of particular importance for the study, since geographic conditions are basic determinants shaping local labor markets. Of the 52 territorial communities of Chernivtsi Oblast, 5 administrative territories belong to the purely mountainous category (Vyzhnytsia and Storozhynets urban communities; Putyla settlement community; Koniatyn and Ust-Putyla rural communities), 14 to the border category (Hertsa and Sokyriany urban communities; Hlyboka and Kelmentsi settlement communities; Chudei, Petrivtsi, Suchevena, Kamianka, Terebleche, Tarashany, Vanchykivtsi, Mamalyha, Livyntsi, and Vashkivtsi rural communities), and three communities are simultaneously mountainous and border communities (Beregomet and Krasnoilsk settlement communities and Seliatyn rural community). The remaining communities of the region can be classified spatially as inland lowland communities – mainly the northern and central parts of the oblast, located in the forest-steppe zone between the Prut and Dniester rivers. This spatial typology makes it possible to group the survey results and reveal how a community's geographic location affects the quality of life of its residents and the financial sustainability of their households.

The generalized socio-demographic and spatial profile of the region's residents who took part in the study is systematized and presented in Table 1.

A detailed spatial analysis of respondent engagement across individual territorial communities of Chernivtsi Oblast (Figure 1) reveals a significant geographic asymmetry in civic activity. The results show that the lowest level of representativeness (10 completed questionnaires per administrative unit) was recorded in the Zastavna and Vashkivtsi urban communities, as well as in the Karapchiv, Terebleche, Kamianka, and Suchevena rural communities. It is worth noting that the rural communities with low engagement are border

communities, which may indicate certain communication barriers or the specific informational isolation of the population in the border zone.

Table 1

Socio-demographic and territorial profile of the empirical study's participants (June – July 2026), %

№	Respondent grouping criterion	Response options (characteristics/ number of respondents)	Share in sample, %
1	Spatial affiliation	Chernivtsi district – 1,105 Dnistrovskyi district – 360 Vyzhnytskyi district – 216	65.7 21.4 12.9
2	Type of settlement	Urban – 99 Rural – 1,437 Urban-type settlement – 145	5.9 85.5 8.6
3	Sex	Women – 1,261 Men – 420	75 25
4	Age	18–25 years – 81 26–35 years – 387 36–45 years – 598 46–60 years – 442 Over 60 years – 173	4.8 23 35.6 26.3 10.3
	Total	1,681 respondents	100

Calculated by the author based on the results of the questionnaire survey.

By contrast, the highest levels of population engagement in the empirical study (more than 50 respondents in each) were demonstrated by 11 territorial communities of the region. The leaders in terms of the number of responses received were the Mahala rural community (131 respondents) and the Novoselytsia urban community (101 respondents). High levels of activity were also shown by residents of the Sokyriany urban (83), Storozhynets urban (74), Kelmentsi settlement (71), Kamianka rural (68), Yurkivtsi rural (68), Vashkivtsi rural (59), Beregomet settlement (58), Stavchany rural (52), and Vikno rural (52) communities.

The substantial empirical coverage of all communities without exception ensures a high degree of accuracy and mathematical reliability for the further conclusions regarding the quality of their infrastructural provision and the level of financial sustainability of households. The resulting distribution demonstrates that the formed sample is a solid basis for further analysis. It makes it possible to present the study of the questionnaire's second block – a direct assessment of the individual financial sustainability of households and the structure of their income under the influence of spatial factors.

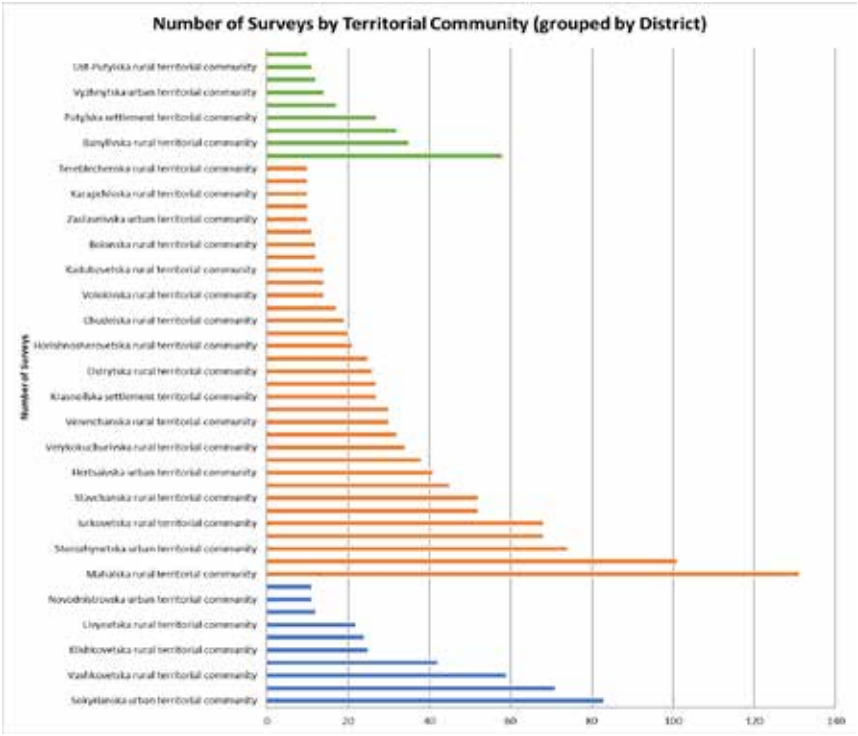


Fig. 1. Spatial analysis of respondent engagement across individual territorial communities of Chernivtsi Oblast

As part of the second block of the questionnaire survey, respondents were asked to answer the question "What are the main sources of income in your family?", for which multiple response selection was offered. The distribution of responses from residents of Chernivtsi Oblast showed that wages remain the basic and most widespread source of household budget formation – indicated by 85.6% of those surveyed. Payments within the state social protection system also play a significant role in providing financial income: 13.4% of respondents indicated a pension, and 8.0% indicated other types of social transfers, among which scholarships and regular or one-time material assistance payments predominate.

Of particular scholarly interest in the context of studying spatial and demographic factors is the distribution of responses regarding additional sources of financing. In particular, 7.1% of those surveyed indicated money transfers or earnings from abroad as their main source of income. In-depth

cross-tabulation analysis made it possible to establish that the overwhelming majority of respondents who chose this option are residents of the border territorial communities of Chernivtsi Oblast. This fact empirically confirms the persistent nature of external labor migration in the border zone and its significant role in maintaining the solvency of the local population.

As for income from entrepreneurial activity (business), recorded at a level of 4.1%, a clear demographic dependency was identified here. The highest concentration of responses regarding business income is characteristic of economically active respondents in the 36–45 age category, which indicates a high level of entrepreneurial potential and self-employment specifically among the middle-aged population.

The generalized structure of the financial income of families in the Chernivtsi region, based on the survey results, is presented in Figure 2.

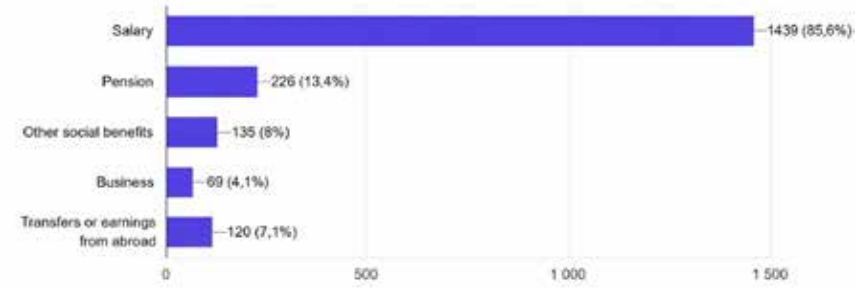


Fig. 2. Main sources of income in the families of Chernivtsi Oblast

An important indicator of the adaptive capacity of the population of Chernivtsi Oblast to macroeconomic challenges is the subjective assessment of households' material situation, which directly reflects their potential to withstand financial shocks.

The results of the responses to the question "Assess the material situation of your family" demonstrated a significant degree of financial vulnerability among the region's residents, as shown in Figure 3. Most respondents – 56.1% – indicated that they have enough for food, medicine, and clothing, but not for appliances or repairs; 18.7% of respondents can afford appliances and repairs, but not major purchases (a car, real estate).

By contrast, an alarming trend is the high share of the population living below the threshold of financial sustainability: 17.7% of those surveyed indicated that they have enough for food but not for clothing and medicine, while 5.0% of respondents stated that they barely make ends meet.

The highest level of material well-being was recorded among only 1.5% of study participants, who are able to make major purchases and consistently accumulate financial savings.

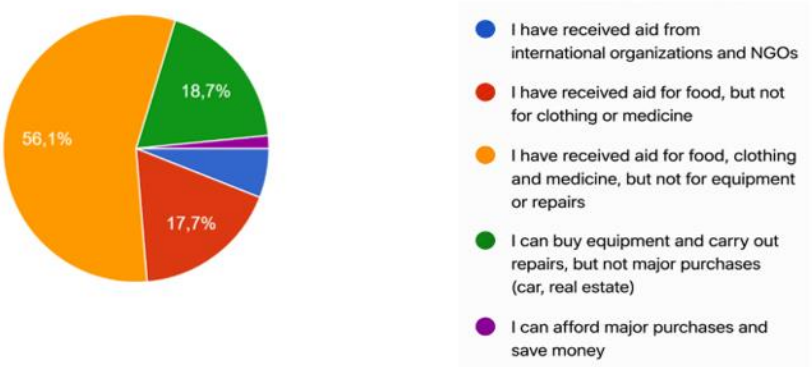


Fig. 3. Respondents' subjective assessment of households' material situation in Chernivtsi Oblast

Cross-tabulation analysis made it possible to identify a clear correlation between financial sustainability and the structure of income (examined in the previous block). In particular, in the group of respondents (1.5%) who are able to accumulate capital and make major purchases, individuals whose households have additional or primary income from entrepreneurial activity or regular money transfers from abroad predominate. This empirically proves that, under conditions of protracted crisis, classic wage income in the region mainly performs the function of sustaining current survival, whereas spatial factors (cross-border transfers) and entrepreneurial factors serve as the key drivers in shaping real financial well-being.

The financial sustainability of private households is directly dependent on local environmental conditions and the overall level of quality of life in the territorial community. Within the third block of the empirical study, respondents were asked to comprehensively assess the level of socio-economic development of their communities. The generalized results showed a predominance of moderate assessments: the absolute majority of respondents (64.9%) indicated an "average" level of community development, 22.6% – "low", and 6.8% – "very low". Positive assessments, by contrast, are extremely rare: only 5.2% of survey participants consider their territory's development level to be "high", and only a minimal 0.5% indicated a "very high" level. The overall distribution of responses from residents of Chernivtsi Oblast is illustrated in Figure 4.

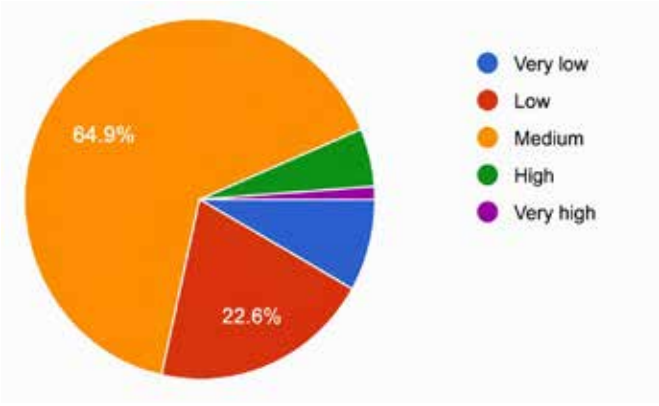


Fig. 4. Respondents' subjective assessment of the overall level of quality of life in the communities of Chernivtsi Oblast

An in-depth spatial analysis revealed a clear geographic asymmetry in the assessments of residents of territorial communities, determined by the specific spatial-economic potential of different territories. In particular, negative assessments ("low" and "very low" levels) are most heavily concentrated in three spatial clusters:

– mountainous communities: Putyla, Koniatyn, Ust-Putyla, Storozhynets, and Vashkivtsi, where remoteness from logistics centers and difficult physical-geographic conditions traditionally limit the opportunities for developing infrastructure and the economic complex;

– border communities: Petrivtsi, Tarashany, Hertsa, and Vashkivetska, which, despite their cross-border status, experience an acute need for institutional modernization amid mass labor migration, often linked to institutional peculiarities and the spread of dual citizenship;

– certain inland lowland communities: small ones (Kostryzhivka, Nedoboivtsi, Nepolokivtsi, Stavchany, Rukshyn) and larger ones (Yurkivtsi, Ostrytsia, Verenchanka, and Hlyboka). In this group, low assessments are caused by local socio-economic disparities and uneven budgetary provision.

By contrast, optimistic assessments ("high" and "very high" levels) were demonstrated by residents of the Chernivtsi (urban), Mamaivtsi, Novoselytsia, and Velykyi Kuchuriv territorial communities. The high subjective level of quality of life in these territories is directly linked to their favorable geographic location (proximity to the regional center and logistics transport corridors), which ensures the stable filling of local budgets, developed infrastructure, and a diversified labor market.

In order to track qualitative changes and transformations in ensuring proper living conditions over the period of implementation of the administrative-territorial reform (over the past five years), respondents were asked to assess the dynamics of development of their communities. The results obtained, presented in Figure 5, show a high degree of polarization and reflect the ambiguity of public opinion.

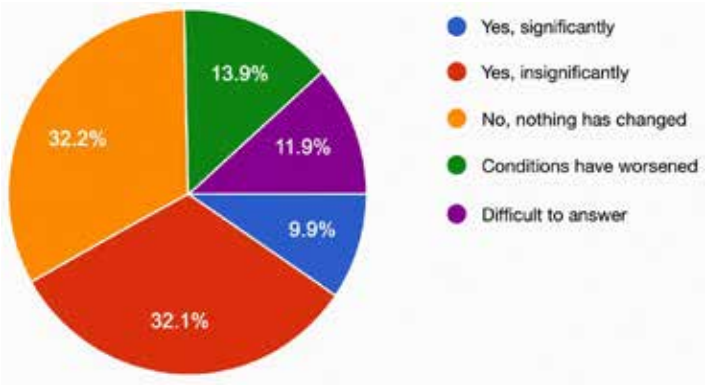


Fig. 5. Respondents' subjective assessment of the dynamics of living conditions and community development over the past 5 years

Only 9.9% of respondents indicated that significant changes had occurred in the development of their community. The largest part of the respondent array split into two almost equal groups: 32.1% saw minor improvements, while 32.2% stated complete stagnation ("no changes occurred"). At the same time, 13.9% of respondents expressed the belief that living conditions in the community had deteriorated, and 11.9% of those surveyed chose the "hard to say" option, which indicates a certain degree of informational detachment of part of the population from local self-government processes.

Cross-tabulation spatial analysis of the responses of those citizens who stated that living conditions had deteriorated (13.9%) made it possible to clearly localize zones of the greatest socio-economic tension within the previously defined spatial clusters:

– lowland (Kostryzhivka, Zastavna, Toporivtsi, Kitsman, Stavchany, Klishkivtsi, and Boiany) communities. This indicates that even under relatively favorable logistical location, internal management factors and a lack of resources can hinder development;

– mountainous (Putyla, Koniatyn, Storozhynets, Banyliv) communities, where infrastructure problems are compounded by the specifics of the terrain;

– border (Sokyriany, Vashkivetska, Karapchiv, Suchevena, Petrivtsi, Hertsa, Livyntsi, Kelmentsi) communities;

– the mixed (Seliatyn) community, where the negative assessment is determined by its doubly complex geographic status and makes it the most vulnerable to financial and economic challenges.

In the context of studying the socio-economic factors of sustainability, an important scholarly task was to clarify whether respondents link improvements in living conditions in their community to the level of its financial capacity (in particular, to growth in local budget revenues, the rational allocation of expenditures for development, etc.). The responses obtained are visualized in Figure 6.

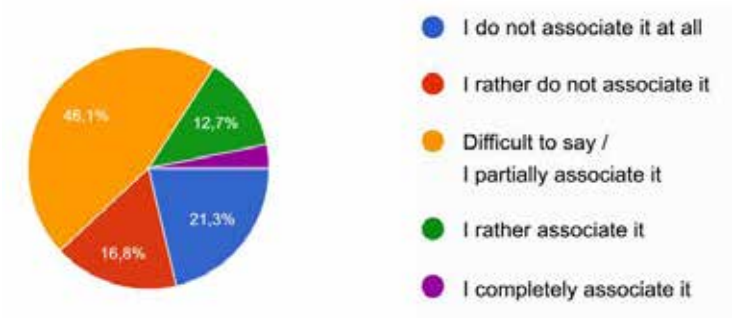


Fig. 6. Respondents' subjective assessment of the link between quality of life and the community's financial capacity

Thus, 21.3% of those surveyed do not link their well-being to the community's financial capacity at all, and 16.8% – "rather do not link it". The largest share of respondents, 46.1%, chose the neutral position "hard to say / link it partially". By contrast, a clear cause-and-effect relationship between local government finances and quality of life is seen by only 12.7% ("rather link it") and a minimal 3.2% ("fully link it") of the region's residents.

Such a distribution of responses becomes entirely understandable and logically motivated when the level of citizens' awareness of local finances is analyzed. As the results shown in Figure 7 demonstrate, the overwhelming majority of the population of Chernivtsi Oblast is completely detached from the budget process and has no information about the local budget for the current year (in particular, through the official websites of territorial communities or public reports by community heads).

Only 15.6% of residents answered “yes”, and 15% answered “hard to say”. At the same time, the figure of 69.4% of those surveyed who stated a complete lack of awareness of their community’s budget is critically high and alarming.

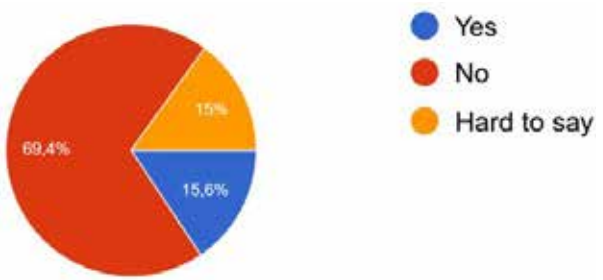


Fig. 7. Level of respondent awareness of the local budget for the current year

These trends are directly related both to the subjective passivity of the population itself and to a certain closedness of the institutional environment of the authorities, which does not sufficiently actively engage the public in the discussion and adoption of financial decisions.



Fig. 8. Level of engagement of the population of Chernivtsi Oblast in budget discussions and “Participatory Budget” instruments

Empirical confirmation of this is provided (Figure 8) by the extremely low level of actual participation (budgetary engagement): only 9.3% of respondents indicated that they had taken part in public budget discussions or in the implementation of “Participatory Budget” projects (local residents’ initiatives). It can be assumed that these are employees of local self-government bodies, local council deputies, or members of their families. In contrast, 11.5% of those surveyed were entirely unaware of the existence of such democratic instruments,

and the vast majority – 79.2% of respondents – consciously or unconsciously did not engage in such initiatives.

The population's quality of life in a community is directly determined by the level of conditions created for the safe and comfortable living of citizens. In this regard, the state of development of local infrastructure (quality of road surfaces, availability of street lighting, general amenity of the territory) is important, as it shapes the living environment for various age and social groups of the population.

Empirical results of responses to the question "Indicate how satisfied you are with the state of development of local infrastructure (roads, lighting, amenities)" recorded a predominance of negative assessments among the residents of Chernivtsi Oblast. Only 4.5% of respondents indicated that they were fully satisfied with the current situation, and 17.3% were "rather satisfied". By contrast, more than half of respondents expressed critical remarks: 31.0% were "rather dissatisfied" with the state of infrastructure in the community, and 22.0% were "completely dissatisfied". A quarter of respondents (25.2%) chose the neutral position ("hard to say"). The full distribution of responses on the five-point Likert scale is illustrated in Figure 9.

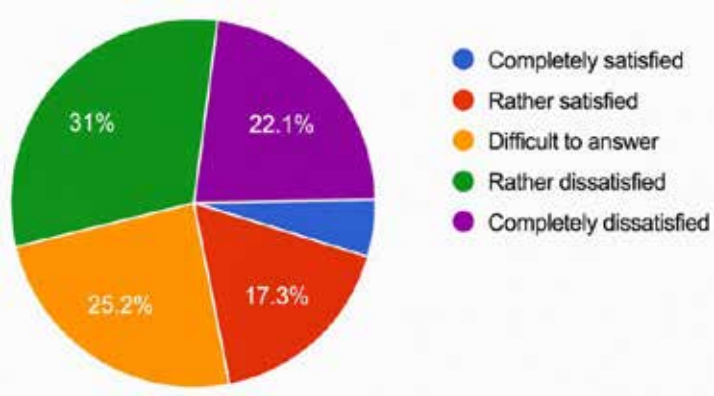


Fig. 9. Level of respondent satisfaction with the state of development of local infrastructure

The generalization of the data obtained makes it possible to state a pervasive dissatisfaction of local residents with virtually all processes related to the socio-economic development of the territorial communities of Chernivtsi Oblast, which is also clearly traced in the previous blocks of the questionnaire.

Another fundamental component that determines the financial sustainability of communities and their attractiveness for human capital is the development and support of social sphere facilities. As part of the survey, respondents were given the opportunity to assess whether financing of the key social sectors (education, medicine, culture, sports) in their community is sufficient. The results of this assessment, presented in Figure 10, confirmed the presence of a shortage of financial resources at the local level.

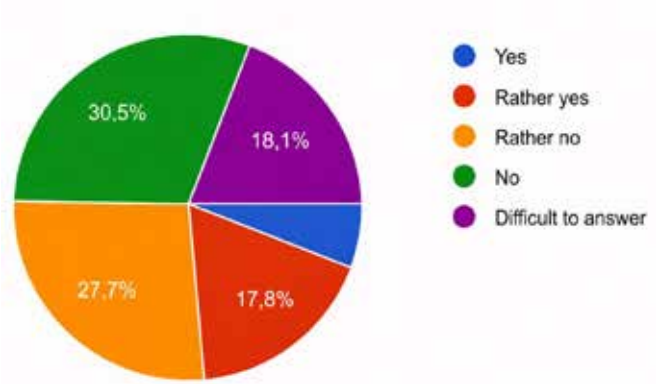


Fig. 10. Respondents' subjective assessment of financing for the social sphere (education, medicine, culture) in the communities

A minimal share of respondents (5.8%) responded fully positively about the level of financing of social infrastructure in their community, while 17.8% chose the "rather yes" option. In contrast, the overwhelming majority of respondents stated an unsatisfactory state of budgetary provision for social expenditures: 27.7% answered "rather no", and a significant 30.5% expressed categorical disagreement ("no"). A rather high figure for this block of the study was the 18.1% of respondents who could not decide on an answer and chose the "hard to say" option, which further confirms the previously identified problem of low financial transparency and insufficient public awareness of the actual allocation of budget funds in the region's communities.

The population's opinion on the effectiveness of budget resource allocation is important, as it defines financing priorities for the key sectors of the social sphere in the community. Respondents were asked to rate the financing priority of five basic sectors of the social sphere on a symmetric scale from 1 to 5, where a score of "1" corresponded to maximum importance (highest priority) and a score of "5" to minimum importance (least important sector). The generalized results of this assessment are illustrated in Figure 11.

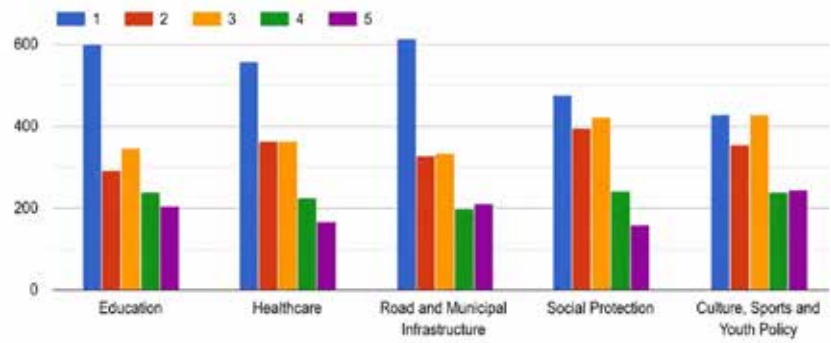


Fig. 11. Distribution of respondents' subjective assessments of the financing priority of individual social-sphere sectors in the communities of Chernivtsi Oblast

A quantitative analysis of the distribution of responses reveals a clear hierarchy of public demands among the residents of Chernivtsi Oblast. The absolute leader in the number of top scores ("1") was road and communal infrastructure – more than 600 respondents identified it as a critically important direction for the priority allocation of budget funds. This fully corresponds to the previously identified high level of dissatisfaction with the state of roads and amenities in the region and confirms that infrastructure development is the main destructive factor affecting quality of life in the Chernivtsi region.

In second and third place in terms of financing relevance are the humanitarian sectors – education and healthcare. A priority of "1" for the education sector was assigned by 600 people, and for healthcare – by more than 550. However, an analysis of moderate scores ("2" and "3") shows that the healthcare sector has a more balanced distribution of responses (around 370 selections for both levels), which indicates a stable and systemic public demand for quality medical care amid current crisis challenges. Systemic needs for social protection of the population also received substantial support: the highest priority for this sector was given by more than 460 study participants. At the same time, the chart shows a noticeable increase in medium-level ratings (a score of "3" was chosen by more than 400 people), which indicates that citizens understand the importance of social support for vulnerable groups under martial law, provided that other sectors are financed in a balanced manner. Culture, sports, and youth policy proved to be the least prioritized for financing, according to respondents. Although a score of "1" was assigned to it by more than 400 people, this category recorded the highest indicators for priority "3" (more than 420 responses) and noticeably higher bars for the lowest priorities "4" and "5" compared to other

sectors. This distribution is typical for a crisis period, when the population tends to consider capital expenditures on culture and sports less urgent, giving preference to infrastructure resilience, physical safety, healthcare, and the preservation of human capital through the education system.

To obtain more pragmatic data on public expectations, respondents were asked a more specific question: "From the list provided, choose the sectors to which (in your opinion) the most local budget funds should be directed". The instrument imposed a selection limit – no more than 3 response options at a time. The generalized results of the study (a total of 1,681 responses were recorded) are shown in Figure 12.

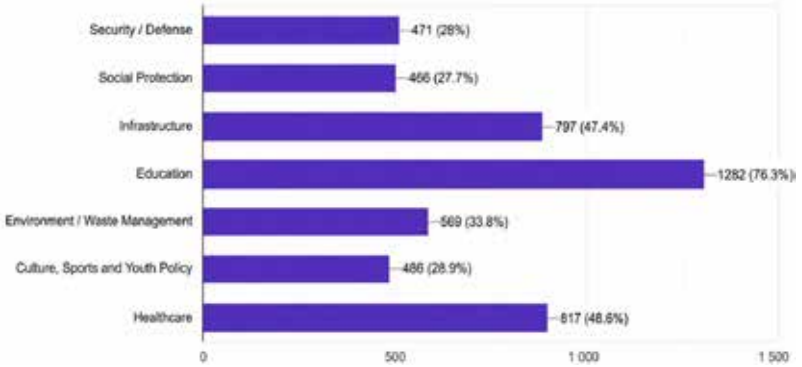


Fig. 12. Priorities of the population of Chernivtsi Oblast regarding the optimization of local budget financing directions

The resulting empirical distribution demonstrates the dominance and leadership of the education sector among financial priorities – this option was chosen by 76.3% of those surveyed. Such a high figure indicates that residents of Chernivtsi Oblast regard the preservation and development of human capital as the main strategic prerequisite for the resilience of their communities, even during the difficult period of war-related crisis.

The next significant group of public demand is formed by critical life-support sectors – healthcare and infrastructure, which received almost equally high support. In particular, 48.6% of respondents pointed to the need to increase healthcare financing, and 47.4% of those surveyed supported the modernization of road and communal infrastructure. These data confirm a previously identified trend: physical health and the quality of the spatial environment (roads, amenities) are basic elements with which the population directly associates the concept of quality of life in the region.

The sphere of ecology and waste management deserves particular attention, having received the votes of 33.8% of study participants. Environmental safety and waste management are pressing problems for Chernivtsi Oblast as the smallest and one of the more densely populated border regions; moreover, the survey results clearly demonstrate a high level of environmental awareness among citizens.

The humanitarian sector and the security block recorded moderate and stable indicators. Directing budget funds to culture, sports, and youth policy is considered appropriate by 28.9% of respondents, which slightly exceeds the figures for security and defense – 28.0% – and social protection of the population – 27.7%. As for the security block, the relatively low share of responses at the level of the communities of border Bukovyna may be explained by the fact that most citizens subconsciously delegate defense financing to the central (state) budget, expecting local budgets of territorial communities to primarily address local socio-economic and infrastructural tasks.

To form a holistic scientific understanding of the financial sustainability of the territories of Chernivtsi Oblast, it is critically important to examine the opinion of direct participants in local processes regarding the destructive factors hindering their development. Within the survey, respondents were asked the question: "Name what, in your opinion, is the main obstacle to improving the community's financial condition". Since the survey allowed for multiple selection (no more than 3 options at a time), the total number of recorded responses amounted to 1,681. The resulting distribution is illustrated in Figure 13.

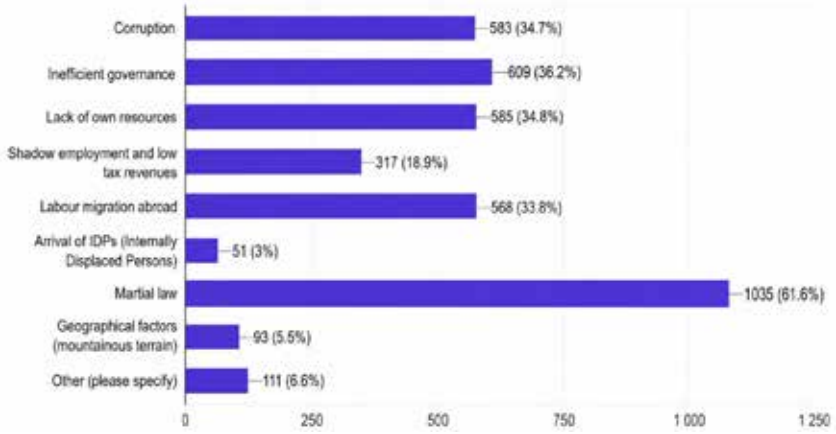


Fig. 13. Respondents' subjective assessment of key barriers and obstacles to improving the financial condition of the communities of Chernivtsi Oblast

The analysis of empirical data makes it possible to single out an unconditional external factor that affects the destabilization of local finances. The majority of respondents – 61.6% – named martial law as the main obstacle to economic growth. This result is entirely logical and reflects the national context: security risks, the withdrawal of part of tax revenues in favor of the state budget (in particular, the "military" personal income tax), and the need to reorient community expenditures to support the defense forces significantly limit capital investment in the development of the oblast's communities.

The next group of factors forms a dense block of institutional and resource-related barriers, whose indicators are almost at the same level (within the range of 33–36%):

– ineffective management ranked second in terms of frequency of mention – chosen by 36.2% of respondents, which is a consequence of the aforementioned problem – the closedness of the institutional environment of the authorities and the lack of cooperation with the public;

– the lack of own resources was noted by 34.8% of those surveyed, reflecting the objective problem of the natural resource endowment and the weakness of the local tax base in many communities of the region;

– corruption as a significant obstacle was marked by 34.7% of study participants, which closely correlates with the previously identified dissatisfaction of citizens with the level of transparency in the formation of local budgets and the adoption of financial decisions.

Particular attention should be paid to a pronounced spatial-demographic factor specific to Chernivtsi Oblast – labor migration abroad, indicated by 33.8% of respondents. Combined with shadow employment and a low level of tax culture (18.9%), this factor significantly limits the financial sustainability of communities. The simplified system of departure of the most able-bodied population and the spread of the phenomenon of dual citizenship in the border territorial communities perpetuate the problem of low revenues from local taxes and fees.

According to the surveyed residents, geographic factors (5.5%) have the least destructive impact on community finances, which points to the population's adaptation to the specifics of the terrain, as does the arrival of internally displaced persons (a minimal 3.0%). The latter figure indicates the successful socio-economic integration of IDPs into the communities of Chernivtsi Oblast: local residents do not perceive forced migrants as a financial burden on the budget, but rather regard them as a new demographic and labor potential for the region.

Within the study of the financial capacity of territorial communities, it was important to gather the opinion of local residents on the opportunities

and prospects for increasing budget revenues and improving the financial sustainability of local self-government (with the choice limited to three alternative options). The total volume of responses amounted to 1,681.

The empirical distribution of respondents' responses (Figure 14) makes it possible to identify the leaders with the highest sample figures: 41.5% – support for local small and medium-sized entrepreneurship, which confirms the population's primary orientation toward expanding local tax bases through internal business activity; 39.6% – intensification of investment activity and the creation of new jobs; and 39.5% – participation in international and domestic grant projects and programs. This indicates a high degree of awareness among residents of the limited nature of communities' internal self-sufficient resources and the need to seek financing sources by attracting extrabudgetary and donor funds. The group of leaders also includes the demand for creating favorable conditions for opening and running a business (34.7%).

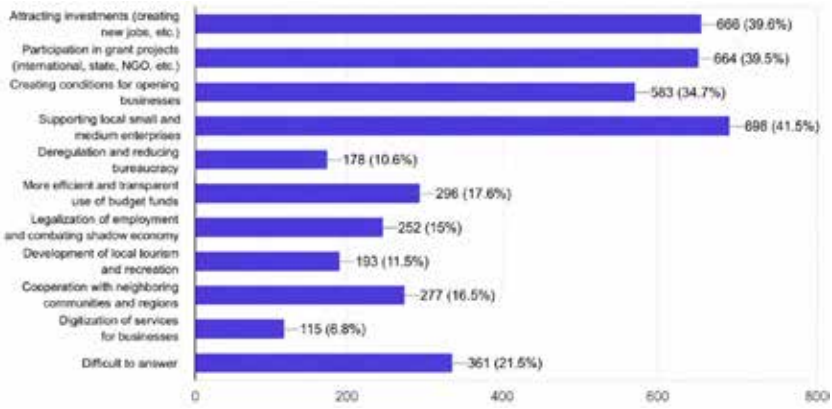


Fig. 14. Respondents' subjective assessment of the opportunities and prospects for improving the financial sustainability of the communities of Chernivtsi Oblast

The second group of indicators, ranging from 10–18%, reflects institutional, managerial, and infrastructural reserves for development. In particular, 17.6% of respondents emphasize the need to increase the efficiency and transparency of the use of existing budgetary resources; 16.5% point to inter-municipal cooperation instruments with neighboring communities; 15.0% to the need to legalize employment and combat the shadow economy; 11.5% to the potential for developing local tourism; and 10.6% to deregulation processes and the reduction of bureaucratic pressure.

A specific indicator of the survey turned out to be the share of respondents who chose the "hard to say" option (21.5%). Such a level of uncertainty may indirectly indicate the complexity with which ordinary citizens perceive financial and budgetary issues, and the need to intensify educational and communication campaigns on the essence of the decentralization reform in the region.

Digitalization of services for business was identified as the least pronounced factor for improving the financial condition (6.8% of respondents). This indicates that, under current crisis challenges, the population tends to prioritize classic, basic opportunities for economic growth – direct investment, capital expenditures, and grant support – viewing digitalization solely as a service function rather than a strategic one.

CONCLUSIONS

The implementation of decentralization reforms in Ukraine is primarily aimed at strengthening the financial sustainability of territorial communities. However, very often such autonomy is accompanied by a number of related challenges and risks. The amalgamation of communities for the joint implementation of a development strategy makes it possible to use resources more effectively and coordinate actions at the regional level, which appears particularly relevant under conditions of war, although not all territories are able to cope with the tasks outlined. The financial sustainability of a territorial community today presupposes the ability to effectively withstand threats of various origins and natures and to quickly restore equilibrium after crisis situations.

Based on the results obtained, the following features of the region can be clearly identified:

– the adaptive capacity of the financial sustainability of the communities of Chernivtsi Oblast, which is determined not only by formal budgetary indicators, but also by the subjective quality of life of the population, its level of well-being, and the institutional transparency of the authorities;

– the vulnerability of household income structure, manifested in the dominance of wages (85.6%), while for the border and mountainous communities of the oblast a specific spatial factor was identified – dependence on external labor migration and private cross-border transfers (7.1%), often linked to institutional peculiarities and the spread of dual citizenship;

– disparities in household financial sustainability: 56.1% of families have funds only for basic survival with no capacity for capital expenditures, 22.7% are below the threshold of financial sustainability, and stable income generation (1.5%) is ensured exclusively through business or income from abroad;

– spatial asymmetry in the population's quality of life across territorial communities: low indicators are observed in purely mountainous, border, and

small inland lowland communities, while higher indicators are recorded among residents of the suburban cluster (the Chernivtsi, Mamaivtsi, and Velykyi Kuchuriv territorial communities);

– a communication gap between local self-government bodies and the population, noted by 69.4% of respondents who have no information at all about their community's current budget, and 79.2% who have never taken part in discussions of local community budgets (public discussions and "Participatory Budget" projects).

Taking into account the above results of the empirical study, the following can be proposed to the local self-government bodies of Chernivtsi Oblast:

– introduce mandatory digital instruments for financial transparency – interactive "Budget for Citizens" visualizations on the websites of all 52 communities and regular public online reports by heads of territorial communities;

– expand the practice of engaging residents through digital platforms (such as Google Forms or specialized services) in selecting local development projects, minimizing the closedness of decision-making;

– optimize budget expenditures to match public demand, taking into account the priorities identified in Figure 11;

– explore opportunities for attracting foreign investment and international grant programs to create quality living conditions for the local population;

– develop local programs to stimulate small business and legalize migrants' income with the aim of transforming external transfers into internal investments.

SUMMARY

The author substantiates the theoretical and methodological foundations and conducts a comprehensive empirical study of the financial sustainability of 52 territorial communities of Chernivtsi Oblast under conditions of the reform of the administrative-territorial system and current societal challenges. Based on the results of a mass questionnaire survey of the population, conducted during June – July 2026 (with a sample size of 1,681 responses), an empirical measurement of the population's subjective assessment of the perception of quality of life and material well-being in the region was carried out.

Using methods of cross-tabulation and spatial analysis, a profound geographic asymmetry and polarization of the population's living conditions were revealed across the formed spatial clusters: mountainous, border (adjoining Romania and Moldova), mixed, and inland lowland communities. The structure of households' financial income was examined, revealing that entrepreneurial activity and cross-border transfers, against the backdrop of the spread of dual citizenship, constitute

an important component in shaping families' income, whereas classic wage income performs only the function of sustaining current survival.

An institutional gap between local authorities and the population was identified: a low level of citizens' awareness of local budget parameters (69.4% uninformed) and weak engagement of local residents in the formation of community budgets (79.2% not engaged). A hierarchy of public demands was determined, and priorities for optimizing the budget expenditures of territorial communities to match the population's real needs were substantiated (with education leading at 76.3%, healthcare at 48.6%, and road and communal infrastructure at 47.4%). The opinion of respondents regarding the problematic factors affecting the financial sustainability of territorial communities was determined, among which martial law (61.6%), ineffective management (36.2%), and a lack of own resources (34.8%) dominate. Practical recommendations were proposed for local self-government bodies to enhance the financial sustainability of communities and improve the quality of living conditions of the local population.

Bibliography

1. Бурик М. Економічна та соціальна стійкість територіальних громад в умовах війни. *Інвестиції: практика та досвід*. 2024. № 12. URL: https://www.nayka.com.ua/index.php/investplan/article/view/3976/4011

2. Дзямулич М., Назарук А. Концепція смарт-розвитку територіальних громад в Україні. *Сучасні кризові явища в економіці та проблеми облікового, контрольного та аналітичного забезпечення управління підприємством :* матеріали XVI Міжнародної науково-практичної конференції, 25 травня 2024 р., Луцьк : ВІП ЛНТУ, 2024. С. 63–65. URL: https://lib.lntu.edu.ua/sites/default/files/2024-11/%D0%97%D0%B1%D1%96%D1%80%D0…

3. Дзямулич М., Назарук А. Цифрова соціальна економіка сільських територій: резильєнтність робочої сили, психологічні моделі управління та аудит персоналу як основа гідної праці. *Економічні науки: збірник наукових праць Луцького національного технічного університету.* Серія «Регіональна економіка». 2025. № 22 (87). С. 62–69. DOI: 10.36910/2707-6296-2025-22(87)-5

4. Коритько Т. Методи оцінки фінансової стійкості місцевих бюджетів. *Економічний простір*. 2008. № 12 (1). С. 140–145. URL: http://nbuv.gov.ua/portal/Soc_Gum/Ekpr/2008_ 12/1/ koritko.pdf

5. Куриш Т. Формування фінансових ресурсів територіальних громад Чернівецької області в умовах суспільних викликів. *Науковий вісник Чернівецького університету: Географія.* 2024. Вип. 849. С. 106–113. URL: https://doi.org/10.31861/geo.2024.849.106-113

6. Мікловда В., Пітюлич М., Сембер С. Теоретичні підходи до формування механізму економічної координації діяльності об'єднаних територіальних громад. *Соціально-економічні проблеми сучасного періоду України*. 2018. Вип. 5. С. 59–63. URL: http://jnas.nbuv.gov.ua/article/UJRN-0000976658

7. Словник української мови / Академія наук Української РСР. Ін-т мов-ва ім. О. О. Потебні ; ред. : І. Назарова, О. Петровська, Л. Скрипник, Л. Юрчук. Київ : Наукова думка, 1978. Т. IX. 853 с.

8. Старостенко Н. Методичні підходи до оцінки фінансової стійкості бюджету міста. *Актуальні проблеми економіки*. 2006. № 7. С. 38–47.

9. Теорія і практика воєнної економіки : навчальний посібник / за ред. В. Кириленка. Київ : ВГІ НАОУ, 2001. Ч. 1. 190 с.

10. Хрупович С., Подвірна Т. Фінансова спроможність бюджетів об'єднаних територіальних громад. *Економіка і суспільство*. 2017. Вип. 13. С. 1259–1262. URL: https://economyandsociety.in.ua/journals/13_ukr/209.pdf

11. Russell R., Kutin J., Marriner T. Financial capability research in Australia. RMIT University, School of Economics. *Finance & Marceting.* 2020. 86 p. URL: https://www.financialcapability.gov.au/sites/www.financialcapability.gov.au/files/2022-01/financial-capability-research-in-australia.pdf

Information about the author:
Kurysh Taras,
Postgraduate Student
Institute of Geography of the National Academy of Sciences of Ukraine
44, Volodymyrska Street, Kyiv, Ukraine

CHAPTER 33

ПУБЛІЧНА ЗВІТНІСТЬ У СФЕРІ МІСЬКОГО ВОДОПОСТАЧАННЯ: НА ПРИКЛАДІ РАЙОННИХ ЦЕНТРІВ ПОЛТАВСЬКОЇ ОБЛАСТІ

Луцов'ят Антон
DOI https://doi.org/10.30525/978-9934-26-714-7-33

ВСТУП

Водопостачання належить до основних функцій міста, адже від його надійності та якості безпосередньо залежать санітарне благополуччя і здоров'я населення, нормальне функціонування житлової забудови та підприємств, а також спроможність громади протистояти кризовим ситуаціям. Для обґрунтованого управління системою водопостачання замало лише виробничої та фінансової звітності підприємства. Необхідні відкриті й зіставні дані, які дають змогу оцінити охоплення населення послугою, якість і безперервність водопостачання, рівень аварійності та втрат води, технічний стан мереж, фінансову стійкість оператора, а також наявність резервних джерел і способів подачі води.

В Україні оцінювання міського водопостачання ускладнюють зношеність інфраструктури та фрагментарність офіційних даних. Відомості публікують на різних вебресурсах, у неоднакових форматах і документах різного призначення. Частина показників характеризує підприємство або всю зону його обслуговування, а не окреме місто. Тому перед міжміським порівнянням необхідно перевіряти звітний період, одиниці виміру, спосіб розрахунку, знаменник і просторову межу показника.

Наявні дослідження охоплюють проблеми міської водної безпеки, технічного стану мереж, фінансової стійкості операторів і відкритості місцевого управління. Водночас не досить опрацьованим залишається питання, наскільки офіційно оприлюднені дані придатні для просторово коректного та незалежно відтворюваного порівняння міських систем водопостачання. Особливого значення набуває узгодження адміністративної межі міста, зони обслуговування оператора й організаційної межі підприємства, оскільки їх невідповідність може спотворювати розрахунки та міжміські зіставлення показників доступності, достатності й ефективності

послуги. Тому публічна звітність у дослідженні розглядається як інформаційна основа сталого управління міським водопостачанням, а не лише як інструмент формальної підзвітності.

Метою роботи є оцінювання повноти, просторово-організаційної відповідності та відтворюваності офіційних даних про водопостачання Полтави, Кременчука, Миргорода та Лубен за 2024 рік, а також визначення мінімальних вимог до публічної звітності операторів.

Об'єктом дослідження є публічна звітність як складник інформаційного забезпечення сталого управління міським водопостачанням. Предметом дослідження є повнота, відтворюваність і просторово-організаційна відповідність офіційних даних операторів водопостачання та органів місцевого самоврядування.

Для досягнення мети поставлено такі завдання: систематизувати наукові й нормативні підходи до оцінювання міського водопостачання; сформувати набір показників і критеріїв їх оцінювання; провести документальний аудит офіційних матеріалів чотирьох районних центрів Полтавської області; визначити основні типи дефіциту даних і метаданих; перевірити стійкість результатів за різних способів узагальнення; визначити мінімальні вимоги до публічної звітності операторів.

Робоче припущення полягає в тому, що в доступних для аналізу офіційних матеріалах за 2024 рік виробничо-фінансова інформація представлена повніше, ніж дані про безпечність, безперервність і кризову стійкість послуги водопостачання для населення.

Наукова новизна полягає в розробленні та пілотній перевірці матриці документального аудиту публічної звітності міських операторів водопостачання. Матриця охоплює 15 показників у шести тематичних блоках і дає змогу розрізняти відсутність даних, їх часткову достатність та повну відтворюваність. Особливістю підходу є одночасна перевірка числового значення, звітного періоду, складників розрахунку та просторово-організаційної межі показника. Стійкість результатів перевірено за трьома способами узагальнення.

Запропоновану матрицю можуть використовувати оператори водопостачання, органи місцевого самоврядування та незалежні дослідники для перевірки повноти, зіставності та відтворюваності офіційної звітності.

1. Публічна інформація в системі сталого управління міським водопостачанням

У працях В. Яков'юка, І. Кичко, А. Холодницької та І. Рощик розглянуто облік забору і втрат води, забезпечення населення якісною питною водою та економічні механізми раціонального водокористування. Для

цього дослідження зазначені праці обґрунтовують включення показників охоплення, втрат води й належного знаменника. Водночас вони не містять процедури перевірки відтворюваності показників за публічними документами[1, 2, 3].

Питання інформаційної підзвітності розкрито у працях з відкритості місцевого управління. Українські науковці обґрунтовують роль нагляду й аудиту в підзвітності комунальних підприємств[4], показують значення відкритих даних у розвитку інформаційної інфраструктури розумного міста[5], розглядають прозорість місцевого самоврядування як чинник інституційної стійкості у воєнний період[6], акцентують на організаційній спроможності працювати з відкритими даними[7], систематизують правові засади прозорості місцевого самоврядування[8]. Ці дослідження визначають інституційне підґрунтя аудиту, однак не встановлюють єдиних критеріїв змістової повноти даних операторів водопостачання.

У роботі розмежовано поняття «публічна інформація» та «відкриті дані». Закон України «Про доступ до публічної інформації» закріплює загальні засади доступу до інформації[9], а постанова Кабінету Міністрів України № 835 визначає механізм оприлюднення наборів у формі

---

[1] Яков'юк В. Оцінка стану водокористування та водоресурсності України в сучасних умовах. *Вчені записки Таврійського національного університету імені В. І. Вернадського.* Серія «Економіка і управління». 2019. Т. 30 (69). № 4. С. 109–113. DOI: 10.32838/2523-4803/69-4-19

[2] Кичко І., Холодницька А. Раціональне водокористування в контексті забезпечення населення якісною питною водою, збереження здоров'я та тривалості життя. *Проблеми і перспективи економіки та управління.* 2021. № 2 (26). С. 7–17. DOI: 10.25140/2411-5215-2021-2(26)-7-17

[3] Рощик І. Трансформування економічних механізмів підвищення ефективності використання водних ресурсів. *Вісник Національного університету водного господарства та природокористування.* Серія «Економічні науки». 2018. Вип. 4 (84). С. 186–198. DOI: 10.31713/ve4201818

[4] Чумакова І. Нагляд і аудит як нові механізми прозорості і підзвітності комунальних підприємств України в умовах децентралізації. *ВГО «Гільдія професійних внутрішніх аудиторів України».* 31 січня 2020 року. URL: https://gildia.kyiv.ua/naglyad-i-audit-yak-novi-mehanizmi-prozorosti-i-pidzvitnosti-komunalnih-pidpriyemstv-ukrayini-v-umovah-detsentralizatsiyi/ (дата звернення: 31.07.2026).

[5] Кунанець Н., Пасічник В., Химич Г. Досвід реалізації проектів класу «Розумне місто» на основі інформаційних і телекомунікаційних технологій. *Вісник Львівського державного університету безпеки життєдіяльності.* 2016. Т. 14. С. 17–37. URL: https://journal.ldubgd.edu.ua/index.php/Visnuk/article/view/313 (дата звернення: 31.07.2026).

[6] Губа М. Прозорість місцевого самоврядування як фактор забезпечення інституційної стійкості системи публічного управління в умовах воєнного стану. *Вісник Херсонського національного технічного університету.* 2024. № 2 (89). С. 285–290. DOI: 10.35546/kntu2078-4481.2024.2.41

[7] Лозинський В. Тенденції розвитку кадрової політики в органах місцевого самоврядування в умовах забезпечення відкритості даних. *Регіональна економіка.* 2024. № 2 (112). С. 94–102. DOI: 10.36818/1562-0905-2024-2-9

[8] Сердюк О., Сороченко М. Засади забезпечення прозорості в діяльності органів місцевого самоврядування. *Вісник Полтавського державного аграрного університету.* Серія «Публічне управління та адміністрування». 2025. № 4. С. 66–74. DOI: 10.32782/pdau.pma.2025.4.11

[9] Про доступ до публічної інформації : Закон України від 13 січня 2011 року № 2939–VI. URL: https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/2939-17#Text (дата звернення: 31.07.2026).

відкритих даних[10]. Відкриті дані – це публічна інформація у форматі, зручному для автоматичного опрацювання та повторного використання. Оскільки в дослідженні використано переважно PDF-звіти, оцінювалася вся офіційно оприлюднена інформація. Можливість її автоматичного зчитування перевірялася окремо.

Для водного сектору додатково важливі вимоги законодавства про питну воду й інформування споживачів[11], санітарні норми[12] і Директива (ЄС) 2020/2184, яка поєднує ризик-орієнтоване управління якістю, доступ до води й інформування громадськості[13].

Міжнародні індикаторні системи розглядають міське водопостачання як багатовимірну систему. Набір O. Jensen і H. Wu орієнтований на практичний моніторинг міської водної безпеки[14]; рамка H. T. Aboelnga та співавторів поєднує ресурси, послуги, управління і ЦСР 6[15]; City Blueprint і Water Sensitive Cities Index демонструють переваги профільного подання результатів замість одного неподіленого рейтингу[16, 17]. У цій роботі зазначені рамки не застосовано як готові індекси: їх використано для обґрунтування тематичних блоків і мінімальних вимог до метаданих.

Для українського контексту принципово важливий фінансовий складник. У статтях дослідники звертають увагу на тарифний дисбаланс, реальні витрати й управління ризиками підприємств водопостачання і водовідведення[18]. В іншому дослідженні пов'язують зелене відновлення

[10] Про затвердження Положення про набори даних, які підлягають оприлюдненню у формі відкритих даних : постанова Кабінету Міністрів України від 21 жовтня 2015 року № 835. URL: https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/835-2015-%D0%BF#Text (дата звернення: 31.07.2026).

[11] Про питну воду, питне водопостачання та водовідведення : Закон України від 10 січня 2002 року № 2918–III. URL: https://zakon.rada.gov.ua/go/2918-14 (дата звернення: 31.07.2026).

[12] Про затвердження Державних санітарних норм та правил «Гігієнічні вимоги до води питної, призначеної для споживання людиною» (ДСанПіН 2.2.4-171-10) : наказ МОЗ України від 12 травня 2010 року № 400. URL: https://zakon.rada.gov.ua/go/z0452-10 (дата звернення: 31.07.2026).

[13] Directive (EU) 2020/2184 of the European Parliament and of the Council of 16 December 2020 on the quality of water intended for human consumption (recast). *Official Journal of the European Union.* 2020. L 435. P. 1–62. URL: https://eur-lex.europa.eu/eli/dir/2020/2184/oj/eng (accessed: 31.07.2026).

[14] Jensen O., Wu H. Urban water security indicators: Development and pilot. *Environmental Science & Policy.* 2018. Vol. 83. P. 33–45. DOI: 10.1016/j.envsci.2018.02.003

[15] Aboelnga H. T., Ribbe L., Frechen F.-B., Saghir J. Urban Water Security: Definition and Assessment Framework. *Resources.* 2019. Vol. 8. № 4. Art. 178. DOI: 10.3390/resources8040178

[16] van Leeuwen C. J., Frijns J., van Wezel A., van de Ven F. H. M. City Blueprints: 24 Indicators to Assess the Sustainability of the Urban Water Cycle. *Water Resources Management.* 2012. Vol. 26. P. 2177–2197. DOI: 10.1007/s11269-012-0009-1

[17] Rogers B. C., Dunn G., Hammer K. et al. Water Sensitive Cities Index: A diagnostic tool to assess water sensitivity and guide management actions. *Water Research.* 2020. Vol. 186. Art. 116411. DOI: 10.1016/j.watres.2020.116411

[18] Слободяник М. Фінансово-економічна стійкість підприємств водопостачання та водовідведення в Україні: оцінка та перспективи розвитку. *Вісник післядипломної освіти.* Серія «Соціальні та поведінкові науки; Управління та адміністрування». 2025. Вип. 31 (60). С. 304–318. DOI: 10.58442/3041-1858-2025-31(60)-304-318

водогосподарського комплексу з європейськими регуляторними вимогами та стійкістю систем[19]. Тому фінансову звітність доцільно доповнювати показниками доступності, якості та безперервності послуги.

Для оцінювання звітності замало лише фінансових показників підприємства. Аудит має також охоплювати характеристики послуги для населення, стан мереж і готовність системи до перебоїв. У цій роботі відтворюваним уважається показник, значення якого можна отримати або перевірити за первинним документом. Під час зіставлення враховано призначення документа – виробниче, управлінське, фінансове або комплексне.

Таблиця 1

Синтез наукових підходів, використаних для побудови аудиту

Напрям	Ключові праці	Основна ідея для дослідження
Міська водна безпека	O. Jensen, H. Wu; H. T. Aboelnga et al.; T. Octavianti, C. Staddon[20]	Багатовимірність оцінювання та залежність набору показників від мети, масштабу й доступності даних.
Сталий міський водний цикл	C. J. van Leeuwen et al.; B. C. Rogers et al.[21]	Тематичний профіль дає змістовнішу картину, ніж один підсумковий бал.
Водокористування в Україні	В. Яков'юк; І. Кичко, А. Холодницька; І. Рощик[22]	Необхідні коректні знаменники, облік втрат, якості та нецентралізованого доступу.
Підзвітність комунальних підприємств	І. Чумакова; О. Сердюк, М. Сороченко[23]	Формальна наявність документа не гарантує змістової повноти інформації.
Цифрове й відкрите місцеве управління	Н. Кунанець, В. Пасічник, Г. Химич; М. Губа; В. Лозинський[24]	Відкритість потребує стандартів даних, організаційної спроможності та безпекових обмежень.
Стійкість водоканалів	М. Слободяник; О. Ігнатенко, В. Мороз[25]	Фінансові показники варто аналізувати разом із технічними, сервісними та кризовими.

Джерело: систематизовано автором за наведеними публікаціями.

[19] Ігнатенко О., Мороз В. Регуляторні засади зеленого відновлення водогосподарського комплексу України в контексті євроінтеграції. *Публічно-управлінські та цифрові практики.* 2026. Вип. 2 (9). С. 37–51. DOI: 10.31673/2786-7412.2026.023624

[20] Див.: Jensen O., Wu H. (2018); Aboelnga H. T. та ін. (2019); Octavianti T., Staddon C. A review of 80 assessment tools measuring water security. *WIREs Water.* 2021. Vol. 8. № 3. P. e1516. DOI: 10.1002/wat2.1516

[21] Див.: van Leeuwen C. J. та ін. (2012); Rogers B. C. та ін. (2020).

[22] Див.: Яков'юк В. (2019); Кичко І., Холодницька А. (2021); Рощик І. (2018).

[23] Див.: Чумакова І. (2020); Сердюк О., Сороченко М. (2025).

[24] Див.: Кунанець Н. та ін. (2016); Губа М. (2024); Лозинський В. (2024).

[25] Див.: Слободяник М. (2025); Ігнатенко О., Мороз В. (2026).

На цій основі сформовано шість тематичних блоків: доступність і достатність, якість і безпечність, безперервність і надійність, технічний стан, фінанси й інвестиції, кризова стійкість. У кризових умовах відкритість має поєднуватися із принципом пропорційності: суспільству потрібні узагальнені відомості про автономність і резервні можливості, але не точні координати, схеми захисту або технічні вразливості критичних об'єктів. Сформовані тематичні блоки визначають мінімальну структуру документального аудиту публічної звітності у сфері міського водопостачання.

2. Дані, критерії та методика порівняльного аудиту

Дослідження проведено як порівняльний документальний аудит офіційних матеріалів. Кожен знайдений показник оцінювали окремо, а результати зіставляли між містами за заздалегідь визначеними критеріями. Для аналізу обрано Полтаву, Кременчук, Миргород і Лубни – чотири міста, що є адміністративними центрами відповідних районів Полтавської області та вирізняються масштабом, організацією роботи оператора й територією обслуговування. Критерії відбору визначено до початку оцінювання, тому вибір не залежав від очікуваних результатів. Вибірка є цільовою, а висновки не можна автоматично поширювати на всі міста України.

Щоб забезпечити коректне порівняння, до кількісного аналізу включали лише дані за 2024 рік. Документи за інші роки, а також плани без фактичних показників за 2024 рік, до матриці не вносили.

Пошук джерел проводили 23–30 липня 2026 року на офіційних сайтах підприємств водопостачання, міських рад, державних органів і регулятора. Для всіх міст використовували однакові групи запитів: охоплення послугою, обсяги поданої води, її якість, аварії та перерви у водопостачанні, втрати води, стан мереж, тарифи, фінансові результати, інвестиції, резервне електроживлення та аварійне забезпечення водою.

Відомості про відібрані документи вносили до робочої таблиці, у якій зазначали назву документа, офіційний вебресурс, звітний період, дату доступу та підставу для включення до кількісного аналізу.

Критеріями включення були: офіційне походження, відкритий доступ без індивідуального запиту, чіткий зв'язок із 2024 роком, належність до водопостачання чи водовідведення, можливість ідентифікувати місто, зону діяльності або організаційну межу оператора. Новини, соціальні мережі, неофіційні агрегатори й документи інших періодів не використовувалися для кількісного кодування. Таке обмеження робить відібрані документи більш зіставними, але не гарантує, що до аналізу потрапили всі офіційні

повідомлення, оприлюднені поза межами річної звітності. Тому відсутність показника в матриці не завжди означає, що відповідна інформація взагалі не публікувалася.

Основу даних становили: звіт КП «Кременчукводоканал» про виробничо-фінансову діяльність за 2024 рік, оприлюднений в архіві щоквартальної звітності[26]; звіт про управління КП ПОР «Полтававодоканал» за 2024 рік[27]; фінансова звітність КП «Тепловодсервіс» за 2024 рік[28]. Для Миргорода планові документи інших років використовувалися лише як контекст і не впливали на бали. Для Лубен за встановленою процедурою пошуку не вдалося виявити відкритий офіційний річний документ за 2024 рік, який містив би фактичні дані про водопостачання та відповідав критеріям включення.

Відібрані матеріали відрізняються за функціональним призначенням, що могло вплинути на кількість доступних показників. Тому аудит характеризує повноту інформації у знайдених офіційних документах, а неоднорідність джерел ураховано як обмеження дослідження.

Під час кодування кожного показника в робочій таблиці фіксували його значення та одиницю виміру, звітний період, територіальну або організаційну межу, наявність складників розрахунку, посилання на первинний документ і застереження щодо інтерпретації. Просторову або організаційну межу вважали визначеною, якщо з тексту документа можна було однозначно встановити, чи стосується показник міста, зони обслуговування або діяльності підприємства загалом. Для показників якості та доступності послуг це мала бути конкретна міська територія або визначена зона обслуговування. Для фінансових та інвестиційних показників потрібно було точно встановити, до якого підприємства чи його підрозділу належать дані, а також чи відокремлена діяльність із водопостачання від інших напрямів роботи.

Причини неповноти даних у матриці позначали такими кодами: NF – показник не знайдено; D – відсутні необхідні складники розрахунку, зокрема чисельник, знаменник або правило обчислення; S – показник стосується іншої території чи організаційної межі; A – дані про водопостачання не відокремлені від інших видів діяльності; C – показники недостатньо зіставні. Для одного показника могло бути зазначено кілька

[26] Щоквартальні звіти щодо виробничо-фінансової діяльності: архів; звіт станом на 1 січня 2025 року (дані за 2024 рік) / КП «Кременчукводоканал». URL: https://kvk.pl.ua/uk/shchokvartalniy-zvit-shchodo-virobnicho-finansovoyi-diialnosti/ (дата звернення: 26.07.2026).

[27] Звіт про управління Комунального підприємства Полтавської обласної ради «Полтававодоканал» за 2024 рік / КП ПОР «Полтававодоканал». 2025. URL: https://vodokanal.poltava.ua/uk/finansova-zvitnist/ (дата звернення: 31.07.2026).

[28] Фінансова звітність за 2024 рік / КП «Тепловодсервіс» Миргородської міської ради. URL: https://myrgorod.pl.ua/files/images/Gkg/Teplovodservis/2024/2024_rik.pdf (дата звернення: 31.07.2026).

кодів, якщо одночасно виявлено декілька причин неповноти; коди не підсумовувалися і не впливали на кількість балів окремо. Система аудиту охоплює 15 показників, відібраних за їхньою управлінською значущістю, нормативним або науковим обґрунтуванням та можливістю перевірки за офіційними документами.

Таблиця 2

Показники та критерії повної відтворюваності

Блок	Показник	Умова оцінювання (2 бали)	Джерело обґрунтування / адаптація
Доступність і достатність	Охоплення централізованим водопостачанням	Частка населення/ домогосподарств, рік і межа послуги	Адаптовано за: JMP; O. Jensen, H. Wu[29]
Доступність і достатність	Подача/реалізація води на особу	Обсяг, період і належний знаменник	Адаптовано за: JMP; В. Яков'юк[30]
Якість і безпечність	Мікробіологічна відповідність	Частка відповідних проб, кількість проб і період	Нормативна основа: ДСанПіН; Директива (ЄС) 2020/2184[31]
Якість і безпечність	Санітарно-хімічна відповідність	Частка відповідних проб, кількість проб і період	Нормативна основа: ДСанПіН; Директива (ЄС) 2020/2184[32]
Безперервність і надійність	Тривалість подачі води	Год/добу або частка часу з послугою	Адаптовано за: JMP; O. Jensen, H. Wu[33]
Безперервність і надійність	Кількість/частота аварій	Кількість із нормуванням на мережу або абонентів	Авторська адаптація за: City Blueprint[34]
Безперервність і надійність	Тривалість ліквідації аварій	Середня/медіанна тривалість і правило обліку	Авторська адаптація за: Water Sensitive Cities Index[35]
Технічний стан	Втрати та необліковані вода	Водний баланс із чисельником і знаменником	Адаптовано за: В. Яков'юк; City Blueprint[36]
Технічний стан	Стан водопровідних мереж	Частка довжини мереж із визначенням категорії	Авторська адаптація за: City Blueprint[37]
Технічний стан	Стан каналізаційних мереж	Частка довжини мереж із визначенням категорії	Авторська адаптація за: City Blueprint[38]

[29] Progress on household drinking-water, sanitation and hygiene 2000–2024: special focus on inequalities / World Health Organization, United Nations Children's Fund. Geneva : World Health Organization and United Nations Children's Fund, 2025. 176 p. URL: https://washdata.org/reports/jmp-2025-wash-households (дата звернення: 31.07.2026); Jensen O., Wu H. (2018).

[30] Див.: WHO/UNICEF Joint Monitoring Programme (2025); Яков'юк В. (2019).

[31] Див.: ДСанПіН 2.2.4-171-10; Директива (ЄС) 2020/2184.

[32] Див.: ДСанПіН 2.2.4-171-10 ; Директива (ЄС) 2020/2184.

[33] Див.: WHO/UNICEF Joint Monitoring Programme (2025) ; Jensen O., Wu H. (2018).

[34] Див.: van Leeuwen C. J. та ін. (2012), City Blueprint.

[35] Див.: Rogers B. C. et al. (2020), Water Sensitive Cities Index.

[36] Див.: Яков'юк В. (2019); van Leeuwen C. J. et al. (2012).

[37] Див.: van Leeuwen C. J. et al. (2012).

[38] Див.: van Leeuwen C. J. та ін. (2012).

Закінчення табл. 2

Блок	Показник	Умова оцінювання (2 бали)	Джерело обґрунтування / адаптація
Фінанси й інвестиції	Чинний та економічно обґрунтований тариф	Показники за однаковою послугою та визначеною межею	Адаптовано за: М. Слободяник[39]
Фінанси й інвестиції	Фінансовий результат	Числовий результат водної діяльності за 2024 рік у релевантній межі	Адаптовано за: М. Слободяник[40]
Фінанси й інвестиції	Виконання інвестиційної програми	План, факт, період і перелік заходів	Адаптовано за: І. Чумакова; О. Ігнатенко, В. Мороз[41]
Кризова стійкість	Резервне електроживлення і автономність	Агрегована частка потужності та години автономії	Авторська адаптація за: H. T. Aboelnga et al.[42]
Кризова стійкість	Альтернативне/аварійне водозабезпечення	Частка мінімальної потреби та план реагування	Авторська адаптація за: H. T. Aboelnga et al.[43]

Джерело: розроблено автором шляхом адаптації індикаторних рамок і нормативних вимог

Кожен показник оцінювали за шкалою від 0 до 2 балів. Два бали надавали, якщо за 2024 рік було оприлюднено числове значення з одиницею виміру, чітким звітним періодом, достатніми складниками розрахунку та правильно визначеною територіальною або галузевою межею. Один бал надавали, якщо числова інформація була наявна, але не виконувалася одна або кілька умов повної відтворюваності: бракувало складників розрахунку, не було визначено просторову межу, водну діяльність не відокремлено від інших видів діяльності або показники були недостатньо зіставними. Нуль балів надавали лише тоді, коли показник не було знайдено за встановленою процедурою пошуку.

Індекс повноти й відтворюваності розраховували як частку фактично набраних балів від максимально можливої суми:

$$I_i = [\Sigma_{j=1}^{m} b_{ij} / (2m)] \times 100\%, \quad (1)$$

де I_i – індекс повноти й відтворюваності для і-го міста; b_{ij} – оцінка j-го показника для і-го міста (0, 1 або 2 бали); m – загальна кількість показників, у цьому дослідженні m = 15; 2m – максимально можлива сума балів. Значення індексу змінюється від 0 до 100%. Чим воно вище, тим повніше й зрозуміліше оприлюднено інформацію.

[39] Див.: Слободяник М. (2025).
[40] Див.: Слободяник М. (2025).
[41] Див.: Чумакова І. (2020); Ігнатенко О., Мороз В. (2026).
[42] Див.: Aboelnga H. T. et al. (2019).
[43] Див.: Aboelnga H. T. et al. (2019).

Окремо визначали частку показників, за якими вдалося знайти хоча б часткові дані:

$$A_i = [\Sigma_{j=1}^{m} 1(b_{ij} > 0) / m] \times 100\%, \quad (2)$$

де A_i – частка наявних показників; 1 ($b_{ij} > 0$) – індикатор, що дорівнює 1, якщо показник отримав 1 або 2 бали, і 0, якщо інформацію не знайдено. Цей показник відображає частку критеріїв, за якими в документах міститься хоча б мінімальна інформація, але не показує ступінь її повноти.

Для порівняння тематичних напрямів розраховували блоковий показник:

$$B_i = (1/6) \Sigma_{k=1}^{6} [\Sigma_{j \in J_k} b_{ij} / (2m_k)] \times 100\%, \quad (3)$$

де B_i – середнє значення за шістьма тематичними блоками; J_k – перелік показників, що входять до k-го блоку; m_k – кількість показників у цьому блоці. Спочатку для кожного блоку визначали частку набраних балів від максимально можливої суми, після чого обчислювали середнє значення шести блоків. Завдяки цьому кожен тематичний блок має однакову вагу незалежно від кількості показників у ньому.

Індекс I_i надає однакову вагу кожному показнику, тоді як B_i – кожному тематичному блоку. Показник A_i фіксує лише факт наявності хоча б часткової інформації. Зіставлення трьох способів узагальнення використовували для перевірки стійкості послідовності міст за різного зважування окремих показників і тематичних блоків[44].

Зведені показники I_i, A_i і B_i характеризують повноту, наявність і тематичний розподіл оприлюдненої інформації. Нульова оцінка означає, що відповідний показник не виявлено за прийнятою процедурою пошуку. Поділ результатів на умовно високі, середні або низькі рівні не застосовували.

Після первинного заповнення матриці автор повторно перевірив арифметичні розрахунки, відповідність присвоєних балів установленим критеріям, належність використаних даних до 2024 року, а також територіальні й організаційні межі показників. Така перевірка дала змогу усунути внутрішні неузгодженості кодування. Оскільки незалежне оцінювання другим дослідником не проводилося, міжекспертну узгодженість результатів у межах цього дослідження не визначали.

У статті наведено критерії оцінювання, основні джерела та підсумкову матрицю; проміжні робочі записи до її обсягу не включено.

[44] Handbook on Constructing Composite Indicators : Methodology and User Guide / OECD/European Union/EC-JRC. Paris : OECD Publishing, 2008. DOI: 10.1787/9789264043466-en

Таблиця 3

Основні джерела фактичних даних за 2024 рік

Населений пункт	Найменування документа	Межа	Формат і ключове обмеження
Кременчук	Звіт про виробничо-фінансову діяльність за 2024 рік[45]	Оператор; річний підсумок	PDF/вебархів; виробничо-фінансовий тип документа підвищує імовірність наявності технічних показників
Полтава	Звіт про управління за 2024 рік[46]	Підприємство обслуговує ширшу зону, ніж місто	PDF; звіт про управління, змішана просторова межа
Миргород	Фінансова звітність за 2024 рік[47]	Багатопрофільне підприємство	PDF; фінансова звітність багатопрофільного підприємства, водна діяльність не виокремлена
Лубни	Відповідний офіційний річний документ за 2024 рік не знайдено	Місто/оператор не ідентифіковано за належним документом	За процедурою пошуку не виявлено документа, що відповідає критеріям включення; усі показники кодуються NF

Джерело: складено автором за офіційними документами, включеними до аналізу.

3. Результати аудиту та зіставлення способів узагальнення даних

Матриця показує нерівномірність висвітлення тематичних напрямів у річній звітності. У документах Кременчука за 2024 рік наведено дані про втрати води, стан водопровідних і каналізаційних мереж, співвідношення тарифів, фінансовий результат і виконання інвестиційної програми. Інформація про обсяг поданої або реалізованої води також наявна, однак бракує даних для розрахунку показника в межах міста. Тому цей показник оцінено в 1 бал.

Для Полтави відтворюються окремі виробничі й фінансові величини. У звіті за 2024 рік зазначено реалізацію 17 248,5 тис. м³ послуг водопостачання та 13 613,4 тис. м³ водовідведення, дохід 687,3 млн грн, витрати 701,5 млн грн і збиток 14,2 млн грн; також наведено орієнтовне тарифне покриття приблизно 70%. Проте підприємство обслуговує ширшу територію, ніж адміністративна межа Полтави, а міського знаменника для розрахунку на особу немає. Через це відповідні показники отримали 1 бал.

[45] Повторне посилання: КП «Кременчукводоканал». Звіт станом на 1 січня 2025 року (дані за 2024 рік).

[46] Повторне посилання: КП ПОР «Полтававодоканал». Звіт про управління за 2024 рік. Полтава, 2025.

[47] Повторне посилання: КП «Тепловодсервіс» Миргородської міської ради. Фінансова звітність за 2024 рік.

Для Миргорода фінансова звітність за 2024 рік характеризує діяльність багатопрофільного підприємства загалом, без достатнього виокремлення показників водопостачання. Планові документи інших років вилучено з кількісного кодування. Один бал отримав лише фінансовий результат як офіційна, але секторно неповна інформація.

Для Лубен у межах установленої процедури пошуку не знайдено відкритого офіційного річного документа за 2024 рік, який містив би фактичні показники водопостачання та давав змогу визначити їхню територіальну або організаційну межу. Тому всі 15 показників оцінено в 0 балів із кодом NF.

Кожний бал у матриці присвоювали на підставі змісту відповідного офіційного документа та перевірки наявності обов'язкових складників, визначених у таблиці 2.

Таблиця 4

Матриця оцінювання офіційної публічної інформації за 2024 рік

№	Показник	Кременчук	Полтава	Миргород	Лубни
1	Охоплення централізованим водопостачанням	0 (NF)	0 (NF)	0 (NF)	0 (NF)
2	Подача/реалізація води з розрахунком на особу	1 (D, S)	1 (D, S)	0 (NF)	0 (NF)
3	Мікробіологічна відповідність	0 (NF)	0 (NF)	0 (NF)	0 (NF)
4	Санітарно-хімічна відповідність	0 (NF)	0 (NF)	0 (NF)	0 (NF)
5	Тривалість подачі води	0 (NF)	0 (NF)	0 (NF)	0 (NF)
6	Кількість/частота аварій	0 (NF)	0 (NF)	0 (NF)	0 (NF)
7	Тривалість ліквідації аварій	0 (NF)	0 (NF)	0 (NF)	0 (NF)
8	Втрати та необлікована вода	2	0 (NF)	0 (NF)	0 (NF)
9	Стан водопровідних мереж	2	0 (NF)	0 (NF)	0 (NF)
10	Стан каналізаційних мереж	2	0 (NF)	0 (NF)	0 (NF)
11	Чинний і економічно обґрунтований тариф	2	1 (C)	0 (NF)	0 (NF)
12	Фінансовий результат	2	1 (S)	1 (A, S)	0 (NF)
13	Виконання інвестиційної програми	2	0 (NF)	0 (NF)	0 (NF)
14	Резервне електроживлення та автономність	0 (NF)	0 (NF)	0 (NF)	0 (NF)
15	Альтернативне/аварійне водозабезпечення	0 (NF)	0 (NF)	0 (NF)	0 (NF)

Примітка: 0 – показник не знайдено; 1 – інформацію знайдено, але умови повної відтворюваності не дотримано; 2 – значення повністю відтворюване. Коди: NF – показник не знайдено; D – відсутні необхідні складники розрахунку; S – просторова або організаційна межа не відповідає місту; A – водну діяльність не відокремлено від інших видів діяльності; C – недостатня зіставність. Для одного показника могло бути зазначено кілька кодів; окремо вони не впливали на кількість балів.

Індекс повноти й відтворюваності становив 43,3% для Кременчука, 10,0% для Полтави, 3,3% для Миргорода та 0,0% для Лубен. Бінарний показник наявності дорівнював відповідно 46,7%, 20,0%, 6,7 і 0,0%, а блоковий показник – 37,5%, 9,7%, 2,8 і 0,0%. Застосування трьох способів узагальнення не змінило послідовності міст: найвище значення в усіх випадках мав Кременчук, далі розташувалися Полтава, Миргород і Лубни. Водночас на підсумкові оцінки міг впливати різний тип первинних документів.

Спільною прогалиною для всіх чотирьох міст стала відсутність повністю відтворюваних показників якості води, безперервності водопостачання та кризової стійкості. У проаналізованих документах за 2024 рік не знайдено достатніх числових даних для самостійної перевірки цих характеристик.

Результати аудиту підтримують робоче припущення: у річній звітності досліджених підприємств виробничо-фінансові аспекти розкрито повніше, ніж показники якості послуги, безперервності водопостачання та кризової готовності.

Відмінності між містами можуть частково пояснюватися типом оприлюдненого документа: виробничо-фінансовий звіт зазвичай містить більше технічних та інвестиційних даних, ніж стандартна фінансова звітність. Перевірити вплив цього чинника можна шляхом порівняння однотипних звітів або повних пакетів офіційної інформації операторів.

Таблиця 5

Підсумкові результати за трьома способами аналізу даних

Місто	I_i, %	A_i, %	B_i, %	Структурний висновок
Кременчук	43,3	46,7	37,5	Повніші технічний і фінансовий блоки в аналізованому документі; сервісні та кризові прогалини
Полтава	10,0	20,0	9,7	Окремі виробничо-фінансові дані; обмеження просторової зіставності
Миргород	3,3	6,7	2,8	Загальна фінансова звітність без достатнього виокремлення водної діяльності
Лубни	0,0	0,0	0,0	Відповідний офіційний річний документ за 2024 рік не знайдено; усі показники NF

Джерело: розрахунки автора.

Отримані значення відображають можливість використання оприлюднених документів для незалежного аналізу.

Просторово-організаційна межа є одним із головних джерел похибки. Зона обслуговування підприємства може не збігатися з адміністративною межею міста, а фінансова звітність може охоплювати кілька видів

діяльності. Для сервісних показників потрібна міська територія або чітко визначена зона послуги; для фінансових показників допустима організаційна межа підприємства, якщо водна діяльність відокремлена й межу явно зазначено. Без такого розмежування розрахунок на одну особу та пряме порівняння між містами залишаються методично слабкими.

Таблиця 6

Тематичні профілі офіційної публічної інформації, %

Блок	Кременчук	Полтава	Миргород	Лубни
Доступність і достатність	25,0	25,0	0,0	0,0
Якість і безпечність	0,0	0,0	0,0	0,0
Безперервність і надійність	0,0	0,0	0,0	0,0
Технічний стан	100,0	0,0	0,0	0,0
Фінанси й інвестиції	100,0	33,3	16,7	0,0
Кризова стійкість	0,0	0,0	0,0	0,0

Джерело: розрахунки автора.

Для практичного використання запропоновано попередню рамку мінімальної публічної звітності. Вона має бути однаковою за логікою полів для різних операторів, але не повинна вимагати оприлюднення точного розташування, схем захисту або технічних вразливостей критичних об’єктів. Подальша апробація рамки має охоплювати ширшу вибірку операторів і різні типи офіційної звітності.

Запропоновану систему звітності доцільно доповнювати файлами у форматах CSV, XLSX або JSON, коротким поясненням методики й архівом попередніх версій. Сканований PDF незручний для повторного використання даних, автоматичного аналізу та порівняння показників за різні роки. Зручний формат файлу, однак, не гарантує повноти й достовірності оприлюдненої інформації.

Дослідження має кілька обмежень. Насамперед цільова вибірка охоплює лише чотири районні центри, тому результати не можна поширювати на всі міста України. Джерела різнилися функціональним призначенням, а для Лубен відповідного вимогам річного документа не виявлено; це могло систематично вплинути на оцінки. Окрім того, вебконтент змінюється, архівні сторінки не завжди мають стабільні URL, а повторне кодування виконав один дослідник, тому міжекспертну узгодженість не визначено. Запропонований набір показників не пройшов експертної валідації, шкала 0 – 1 – 2 узагальнює різні ступені неповноти, а частина інформації про кризову стійкість може не оприлюднюватися з безпекових причин.

Таблиця 7

Попередня рамка мінімальної публічної звітності оператора

Розділ звіту	Обов'язкові поля	Періодичність	Формат / безпекове застереження
Межа послуги	Населення, абоненти, населені пункти, зміни межі	Щорічно	Без адрес критичних об'єктів
Водний баланс	Піднято, подано, реалізовано, втрати, методика	Щоквартально/ щорічно	Агреговано за системою
Якість води	Кількість проб, частка відповідних, групи параметрів	Щоквартально	Без надмірної технічної деталізації
Стабільність	Год/добу, кількість і тривалість незапланованих перерв	Щоквартально	Районний, не адресний розріз
Мережі	Довжина, ветхі ділянки, аварійність на кілометр	Щорічно	Без схем уразливих вузлів
Фінанси	Тариф, собівартість, покриття, результат водної діяльності	Щоквартально/ щорічно	У межах вимог звітності
Інвестиції	План, факт, фізичні результати, джерела фінансування	Щорічно	Без надмірної технічної деталізації
Кризова стійкість	Частка резервного живлення, години автономії, покриття альтернативами	Щорічно та після тестування	Лише агреговані показники
Метадані	Рік, одиниця, чисельник, знаменник, межа, дата оновлення	Під час кожного оновлення	CSV/XLSX/JSON, стабільний URL; без чутливих технічних даних

Джерело: розроблено автором.

Подальша перевірка методики має охоплювати ширшу вибірку однотипних звітів і незалежне повторне кодування частини матеріалів другим дослідником. Це дасть змогу оцінити вплив типу документа й узгодженість присвоєння балів.

ВИСНОВКИ

Документальний аудит показав, що управлінська цінність документа залежить від наявності метаданих, потрібних для перевірки наведених показників. Для чотирьох районних центрів Полтавської області проаналізовано офіційні документи з фактичними даними за 2024 рік за матрицею з 15 показників у шести тематичних блоках.

Найповніше вимогам аудиту відповідали документи Кременчука, значно нижчі результати отримано для Полтави й Миргорода, тоді як для Лубен підходящого річного документа не виявлено. Послідовність міст не змінилася за бінарним показником наявності та блоковим способом обчислення. Спільною прогалиною стала відсутність повністю відтворюваних показників якості води, безперервності водопостачання та кризової стійкості. Отримані оцінки відображають можливість незалежної перевірки даних публічної звітності, а не фактичний стан систем водопостачання.

У досліджених містах річні документи повніше висвітлюють виробничо-фінансову діяльність підприємств, ніж якість, безперервність і кризову стійкість послуги. На оцінки могли впливати функціональне призначення джерел, межа діяльності оператора та ступінь відокремлення водопостачання від інших видів діяльності.

Практичним результатом є попередня рамка мінімальної публічної звітності, що охоплює межу послуги, водний баланс, якість і безперервність водопостачання, стан мереж, фінанси, інвестиції, кризову автономність і метадані. Її доцільно реалізовувати разом із файлами CSV, XLSX або JSON, стабільними URL і архівом попередніх версій, не розкриваючи адрес, схем захисту й технічних вразливостей критичних об'єктів. Перед практичним або нормативним застосуванням рамку варто експертно оцінити за участю операторів, органів місцевого самоврядування, громад і незалежних дослідників, а також апробувати на ширшій вибірці однотипних звітів.

АНОТАЦІЯ

Офіційну публічну інформацію розглянуто як складник сталого й кризостійкого управління міським водопостачанням. Мета дослідження – оцінити повноту, територіальну й організаційну відповідність та відтворюваність даних про водопостачання Полтави, Кременчука, Миргорода і Лубен за 2024 рік.

Дослідження проведено як порівняльний документальний аудит офіційних річних матеріалів за єдиними критеріями включення. Матриця охоплює 15 показників у шести тематичних блоках, шкалу 0–2 бали та коди причин неповноти. Індекс повноти й відтворюваності становив 43,3% для Кременчука, 10,0% для Полтави, 3,3% для Миргорода та 0,0% для Лубен.

Найбільші спільні прогалини виявлено щодо якості води, безперервності водопостачання та готовності до кризових ситуацій. Неоднорідність документів і просторово-організаційних меж обмежує можливість прямого порівняння міст. За результатами дослідження запропоновано попередню рамку мінімальної публічної звітності з машинозчитувальними даними, стабільними посиланнями та безпековими обмеженнями.

Використання інструментів штучного інтелекту. Під час підготовки статті використовувався ChatGPT (модель GPT 5.6-Sol, OpenAI) як допоміжний інструмент для формування пошукових запитів, пошуку потенційно релевантних джерел і мовного редагування. Автор самостійно перевірив усі джерела за первинними публікаціями й офіційними вебресурсами. Добір даних, кодування, розрахунки, інтерпретація результатів і висновки виконані автором, який несе відповідальність за зміст статті.

Література

1. Progress on household drinking-water, sanitation and hygiene 2000–2024: special focus on inequalities / World Health Organization, United Nations Children's Fund. Geneva : World Health Organization and United Nations Children's Fund, 2025. 176 p. URL: https://washdata.org/reports/jmp-2025-wash-households (дата звернення: 31.07.2026).

2. Octavianti T., Staddon C. A review of 80 assessment tools measuring water security. *WIREs Water.* 2021. Vol. 8. № 3. P. e1516. DOI: 10.1002/wat2.1516

3. Яков'юк В. Оцінка стану водокористування та водоресурсності України в сучасних умовах. *Вчені записки Таврійського національного університету імені В. І. Вернадського.* Серія «Економіка і управління». 2019. Т. 30 (69). № 4. С. 109–113. DOI: 10.32838/2523-4803/69-4-19

4. Кичко І., Холодницька А. Раціональне водокористування в контексті забезпечення населення якісною питною водою, збереження здоров'я та тривалості життя. *Проблеми і перспективи економіки та управління.* 2021. № 2 (26). С. 7–17. DOI: 10.25140/2411-5215-2021-2(26)-7-17

5. Рощик І. Трансформування економічних механізмів підвищення ефективності використання водних ресурсів. *Вісник Національного університету водного господарства та природокористування.* Серія «Економічні науки». 2018. Вип. 4 (84). С. 186–198. DOI: 10.31713/ve4201818

6. Чумакова І. Нагляд і аудит як нові механізми прозорості і підзвітності комунальних підприємств України в умовах децентралізації. *ВГО «Гільдія професійних внутрішніх аудиторів України».* 31 січня 2020 року. URL: https://gildia.kyiv.ua/naglyad-i-audit-yak-novi-mehanizmi-prozorosti-i-pidzvitnosti-komunalnih-pidpriyemstv-ukrayini-v-umovah-detsentralizatsiyi/ (дата звернення: 31.07.2026).

7. Кунанець Н., Пасічник В., Химич Г. Досвід реалізації проектів класу «Розумне місто» на основі інформаційних і телекомунікаційних технологій. *Вісник Львівського державного університету безпеки життєдіяльності.* 2016. Т. 14. С. 17–37. URL: https://journal.ldubgd.edu.ua/index.php/Visnuk/article/view/313 (дата звернення: 31.07.2026).

8. Губа М. Прозорість місцевого самоврядування як фактор забезпечення інституційної стійкості системи публічного управління в умовах воєнного стану. *Вісник Херсонського національного технічного університету.* 2024. № 2 (89). С. 285–290. DOI: 10.35546/kntu2078-4481.2024.2.41

9. Лозинський В. Тенденції розвитку кадрової політики в органах місцевого самоврядування в умовах забезпечення відкритості даних. *Регіональна економіка.* 2024. № 2 (112). С. 94–102. DOI: 10.36818/1562-0905-2024-2-9

10. Сердюк О., Сороченко М. Засади забезпечення прозорості в діяльності органів місцевого самоврядування. *Вісник Полтавського державного аграрного університету.* Серія «Публічне управління та адміністрування». 2025. № 4. С. 66–74. DOI: 10.32782/pdau.pma.2025.4.11

11. Про доступ до публічної інформації : Закон України від 13 січня 2011 року № 2939–VI. URL: https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/2939-17#Text (дата звернення: 31.07.2026).

12. Про затвердження Положення про набори даних, які підлягають оприлюдненню у формі відкритих даних : постанова Кабінету Міністрів України від 21 жовтня 2015 року № 835. URL: https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/835-2015-%D0%BF#Text (дата звернення: 31.07.2026).

13. Про питну воду, питне водопостачання та водовідведення : Закон України від 10 січня 2002 року № 2918–III. URL: https://zakon.rada.gov.ua/go/2918-14 (дата звернення: 31.07.2026).

14. Про затвердження Державних санітарних норм та правил «Гігієнічні вимоги до води питної, призначеної для споживання людиною» (ДСанПіН 2.2.4-171-10) : наказ МОЗ України від 12 травня 2010 року № 400. URL: https://zakon.rada.gov.ua/go/z0452-10 (дата звернення: 31.07.2026).

15. Directive (EU) 2020/2184 of the European Parliament and of the Council of 16 December 2020 on the quality of water intended for human consumption (recast). *Official Journal of the European Union.* 2020. L 435. P. 1–62. URL: https://eur-lex.europa.eu/eli/dir/2020/2184/oj/eng (accessed: 31.07.2026).

16. Jensen O., Wu H. Urban water security indicators: Development and pilot. *Environmental Science & Policy.* 2018. Vol. 83. P. 33–45. DOI: 10.1016/j.envsci.2018.02.003

17. Aboelnga H. T., Ribbe L., Frechen F.-B., Saghir J. Urban Water Security: Definition and Assessment Framework. *Resources.* 2019. Vol. 8. № 4. Art. 178. DOI: 10.3390/resources8040178

18. van Leeuwen C. J., Frijns J., van Wezel A., van de Ven F. H. M. City Blueprints: 24 Indicators to Assess the Sustainability of the Urban Water Cycle. *Water Resources Management.* 2012. Vol. 26. P. 2177–2197. DOI: 10.1007/s11269-012-0009-1

19. Rogers B. C., Dunn G., Hammer K., et al. Water Sensitive Cities Index: A diagnostic tool to assess water sensitivity and guide management actions. *Water Research.* 2020. Vol. 186. Art. 116411. DOI: 10.1016/j.watres.2020.116411.

20. Слободяник М. Фінансово-економічна стійкість підприємств водопостачання та водовідведення в Україні: оцінка та перспективи розвитку. *Вісник післядипломної освіти.* Серія «Соціальні та поведінкові науки; Управління та адміністрування». 2025. Вип. 31 (60). С. 304–318. DOI: 10.58442/3041-1858-2025-31(60)-304-318

21. Ігнатенко О., Мороз В. Регуляторні засади зеленого відновлення водогосподарського комплексу України в контексті євроінтеграції. *Публічно-управлінські та цифрові практики.* 2026. Вип. 2 (9). С. 37–51. DOI: 10.31673/2786-7412.2026.023624

22. Щоквартальні звіти щодо виробничо-фінансової діяльності: архів; звіт станом на 01.01.2025 року (дані за 2024 рік) / КП «Кременчукводоканал». URL: https://kvk.pl.ua/uk/shchokvartalniy-zvit-shchodo-virobnicho-finansovoyi-diialnosti/ (дата звернення: 26.07.2026).

23. Звіт про управління Комунального підприємства Полтавської обласної ради «Полтававодоканал» за 2024 рік / КП ПОР «Полтававодоканал». 2025. URL: https://vodokanal.poltava.ua/uk/finansova-zvitnist/ (дата звернення: 31.07.2026).

24. Фінансова звітність за 2024 рік / КП «Тепловодсервіс» Миргородської міської ради. URL: https://myrgorod.pl.ua/files/images/Gkg/Teplovodservis/2024/2024_rik.pdf (дата звернення: 31.07.2026).

25. Handbook on Constructing Composite Indicators : Methodology and User Guide / OECD/European Union/EC-JRC. Paris : OECD Publishing, 2008. DOI: 10.1787/9789264043466-en

Information about the author:
Lutsoviat Anton,
Postgraduate Student
Institute of Geography of the National Academy of Sciences of Ukraine
44, Volodymyrska Street, Kyiv, Ukraine

CHAPTER 34

ОВЕРЛЕЙНИЙ АНАЛІЗ ПЛАНОВИХ ПЕРЕФОРМУВАНЬ РІЧКИ ПРУТ НА ПЕРЕДГІРНІЙ ДІЛЯНЦІ ТА ЇХ ПРАКТИЧНЕ ЗНАЧЕННЯ

Пасічник Микола, Григорійчук Віталій, Мартинова Хавруняк Андре
DOI https://doi.org/10.30525/978-9934-26-714-7-34

ВСТУП

Річкові системи Українських Карпат і Передкарпаття перебувають під постійним впливом двох різноспрямованих груп чинників – природної морфодинамічної активності, властивої гірським і передгірним водотокам, і зростаючого антропогенного навантаження на долини річок. Планові переформування русла (бічна ерозія берегів, міграція меандрів, зміна рукавності, звуження чи розширення заплавно-руслового поясу) – природний і невід'ємний процес розвитку будь-якої алювіальної річки. Проте в межах щільно заселених і господарсько освоєних територій Передкарпаття вони набувають виразного прикладного значення, оскільки безпосередньо впливають на стан прибережної інфраструктури, сільськогосподарських угідь і, зокрема, об'єктів централізованого водопостачання населених пунктів.

Річка Прут, яка бере початок у найвищій частині Українських Карпат і послідовно перетинає гірську, передгірну та рівнинну природні зони, є показовим об'єктом для вивчення закономірностей планової динаміки русла: у межах порівняно короткого відтинка долини тут поєднуються риси як активної, так і відносно стабільної руслової морфодинаміки, а густа мережа населених пунктів і господарських об'єктів у заплаві створює практичний запит на розуміння того, де саме і з якою інтенсивністю відбуваються ці зміни.

Актуальність дослідження визначається необхідністю переходу від описового, якісного розуміння руслових процесів до кількісно обґрунтованої, просторово диференційованої оцінки їхньої інтенсивності на конкретних ділянках річища – оцінки, яка може слугувати основою для прийняття рішень щодо берегоукріплення, планування забудови в межах заплави чи оцінки ризиків для вже наявних інженерних споруд. Такий підхід задовольняє

загальну логіку сталого розвитку територій, оскільки поєднує природничо-наукове дослідження геоморфологічних процесів із практичною оцінкою їхніх наслідків для господарської інфраструктури регіону.

Метою роботи є виявлення й аналіз планових переформувань русла річки Прут у межах передгірної ділянки від м. Коломия до гирла р. Черемош на основі оверлейного зіставлення різночасових картографічних і даних дистанційного зондування Землі, а також оцінка практичного значення виявлених закономірностей для окремих об'єктів водогосподарської інфраструктури, які розташовані в межах досліджуваного відтинка долини.

Досягнення поставленої мети передбачало розв'язання таких завдань:

– охарактеризувати природні умови басейну Пруту та теоретичні засади дослідження руслових процесів;

– розробити й застосувати методику опрацювання різночасових картографічних і супутникових матеріалів засобами геоінформаційних систем;

– виконати оверлейний аналіз планового положення русла на репрезентативних ділянках дослідженого відтинка та виявити просторові закономірності інтенсивності руслових деформацій;

– оцінити практичне значення отриманих результатів на прикладі інфільтраційних водозабірних споруд, розташованих у межах або поблизу дослідженої ділянки.

Об'єктом дослідження є русло річки Прут у межах передгірного відтинка долини від м. Коломия до гирла р. Черемош. Предметом дослідження є планові переформування цього русла за період 1884–2025 рр. та їхнє практичне значення для об'єктів водогосподарської інфраструктури (водозаборів) регіону.

Відповідно до поставлених завдань, робота структурована в чотири розділи. Перший розділ висвітлює фізико-географічні умови басейну річки Прут – геолого-геоморфологічну будову, кліматичний і гідрологічний режим, ландшафтну структуру та викладає теоретичні засади сучасного руслознавства, включно з класифікацією типів руслових деформацій і чинників їхнього розвитку. Другий розділ описує програмне та картографічно-інформаційне забезпечення дослідження: використані історичні й сучасні джерела, методику їхньої геоприв'язки та оцифрування, а також інструментарій геоінформаційного аналізу, застосований для зіставлення різночасових положень русла. Третій розділ представляє результати оверлейного аналізу планових переформувань русла на п'яти репрезентативних ділянках дослідженого відтинка за період 1884–2025 рр. Четвертий розділ розкриває практичне значення отриманих результатів на прикладі трьох інфільтраційних водозаборів передгірної ділянки

Пруту, демонструючи безпосередній зв'язок між русловою динамікою та надійністю систем питного водопостачання регіону.

Такий послідовний перехід від природних передумов і теорії до методики, емпіричних результатів і практичного застосування дає змогу розглянути планові переформування русла Пруту не як ізольоване геоморфологічне явище, а як складову ширшої проблематики сталого розвитку річкових природно-антропогенних систем Передкарпаття.

1. Фізико-географічні умови басейну річки Прут та теоретичні засади дослідження руслових процесів

Річка Прут є одним із ключових водних об'єктів південно-західної частини України та належить до транскордонної частини басейну Нижнього Дунаю. Вона є лівою притокою Дунаю і через нього належить до басейну Чорного моря. У межах України Прут пов'язаний передусім із територією Івано-Франківської та Чернівецької областей, а нижче за течією – з територіями Молдови та Румунії. Загальна довжина річки становить близько 967 км, площа водозбірного басейну – близько 27,5 тис. км²[1]. Прут бере початок у Чорногорі, в улоговині між горами Говерла та Брескул, тобто в межах найвищої частини Українських Карпат, що визначає його гірський характер у верхній течії та значну роль орографічних чинників у формуванні стоку[2].

У ряду річок басейну Верхнього Дунаю, що беруть початок в Українських Карпатах, Прут посідає особливе місце завдяки поєднанню значної довжини, великої площі водозбору й повного розвитку гірсько-передгірно-рівнинного профілю в межах порівняно компактної території. На відміну від цілком гірських приток, що зберігають свій характер на всій довжині, або від суто рівнинних водотоків Прут-Дністровського межиріччя, Прут послідовно відображає значну кількість типів руслового процесу – від глибинної ерозії та транспорту валунно-галькового матеріалу у верхів'ях до розвиненого меандрування й акумуляції в нижній течії. Через зазначене він є зручним модельним об'єктом для вивчення закономірностей просторової зміни морфодинаміки річища вздовж поздовжнього профілю, оскільки в межах одного водотоку можна простежити практично всі основні типи планових деформацій, характерні для гірських і передгірних річок Карпатського регіону.

---

[1] Гребінь В. В. Прут // Енциклопедія сучасної України / редкол.: І. М. Дзюба, А. І. Жуковський, М. Г. Железняк та ін. Київ : Інститут енциклопедичних досліджень НАН України, 2023. URL: https://esu.com.ua/article-879390.

[2] Природа Українських Карпат / за ред. К. І. Геренчука. Львів : Вид-во Львівського ун-ту, 1968. 267 с.

Транскордонний статус річки надає їй особливого значення не лише як природного, а і як водогосподарського та соціально-економічного об'єкта. Прут послідовно перетинає території з різними адміністративними, господарськими та природоохоронними режимами, що позначається на характері використання його долини, інтенсивності антропогенного навантаження та підходах до регулювання русла. У межах верхньої і середньої течії річка виконує переважно природну функцію дренування гірської та передгірної території, тоді як у пониззі, за межами України, її роль ускладнюється потребами меліорації, судноплавства й прикордонного водокористування. Ця обставина є важливою для дослідження планових переформувань русла, оскільки різні ділянки Пруту перебувають під різним ступенем інженерного втручання, а отже, демонструють різну інтенсивність природної морфодинамічної активності[3].

Природні умови басейну Пруту мають виразну висотну і ландшафтну диференціацію. У працях К. І. Геренчука територія, пов'язана з басейном Пруту, розглядається в системі трьох великих природних блоків: Українських Карпат, Передкарпаття та рівнинних лісостепових територій Прут-Дністровського межиріччя[4]. Для Івано-Франківської області характерне поєднання північно-східної частини Подільської височини, середньої передкарпатської смуги з піднятим і сильно розчленованим рельєфом та південно-західної гірської частини Українських Карпат[5]. У Чернівецькій області долина Пруту виступає важливим природним рубежем: на північ від неї поширюється лісостепова рівнина Прут-Дністровського межиріччя, між Прутом і краєм Карпат розміщене Передгір'я, а на південному заході – гірська частина Буковинських Карпат[6]. Така будова території пояснює контрастність руслових процесів, як-от від вузької гірської долини з великими похилами у верхів'ях до ширших передгірних і рівнинних ділянок із розвиненою заплавою та вищою можливістю планових переформувань.

Важливо відзначити, що межі між виділеними природними блоками не є різкими, а лише перехідними смугами, у яких поступово змінюються геоморфологічні, кліматичні й ландшафтні параметри. Саме в таких перехідних зонах – на межі гір і передгір'я, передгір'я і рівнини – найчастіше спостерігається підвищена морфодинамічна активність річища,

[3] План управління річковим басейном Дунаю на 2025–2030 роки. Суббасейни Пруту та Сірету / Державне агентство водних ресурсів України. URL: https://davr.gov.ua/plan-upravlinnya-richkovim-basejnom-dunayu1.

[4] Природа Українських Карпат / за ред. К. І. Геренчука. Львів : Вид-во Львівського ун-ту, 1968. 267 с.

[5] Природа Івано-Франківської області / за ред. К. І. Геренчука. Львів : Вища школа, 1973. 157 с.

[6] Природа Чернівецької області / за ред. К. І. Геренчука. Львів : Вища школа, 1978. 160 с.

оскільки тут поєднуються висока енергія потоку, значне надходження уламкового матеріалу і водночас зменшення транспортувальної здатності річки внаслідок зниження похилів. Це робить перехідні ділянки басейну Пруту пріоритетними об'єктами для аналізу планових деформацій русла в межах цього дослідження.

У верхній течії, до району Делятина, Прут має переважно гірський характер: долина V-подібна, місцями ущелиноподібна, русло порожисте, з водоспадами і значними локальними перепадами висот. На ділянці Ворохта – Яремче річка проходить через скельні й валунно-галькові руслові форми; нижче Делятина долина поступово набуває трапецієподібних рис і помітно розширюється[7]. У межах Передкарпаття та передгірних рівнин Прут приймає низку правобережних карпатських приток, серед яких найважливішою для зростання водності є Черемош. Саме після його впадіння водність Пруту істотно збільшується, а до району Чернівців річка вже формує основну частину свого стоку[8]. Це має істотне значення для дослідження руслових деформацій, оскільки поєднання значної водності, паводкового режиму, надходження уламкового матеріалу з Карпат і наявності алювіальних відкладів створює передумови для активної бічної ерозії, переформування берегів і зміни конфігурації русла.

Кожна з приток, що впадає в Прут у межах гірської та передгірної ділянок, привносить власний режим водності й наносів, сформований умовами свого малого водозбору. Притоки з крутими похилами й вузькими долинами постачають переважно грубоуламковий матеріал – валуни та гальку, тоді як притоки, що дренують більш вирівняні ділянки передгір'я, транспортують значну частку піщано-глинистої фракції. У місцях впадання приток у головне русло Пруту нерідко формуються конуси виносу, локальні розширення долини та ділянки підвищеної акумуляції, які, зі свого боку, впливають на конфігурацію головного потоку, спричиняють відхилення динамічної осі течії та створюють передумови для локального підмиву протилежного берега.

Густота річкової мережі басейну Пруту є нерівномірною і закономірно знижується в напрямку від гірської частини до рівнинної. У межах Українських Карпат, де випадає найбільша кількість атмосферних опадів, а рельєф характеризується значним ерозійним розчленуванням, формується густа мережа малих і середніх водотоків із крутими

[7] Гребінь В. В. Прут // Енциклопедія сучасної України / редкол.: І. М. Дзюба, А. І. Жуковський, М. Г. Железняк та ін. Київ : Інститут енциклопедичних досліджень НАН України, 2023. URL: https://esu.com.ua/article-879390.

[8] План управління річковим басейном Дунаю на 2025–2030 роки. Суббасейни Пруту та Сірету / Державне агентство водних ресурсів України. URL: https://davr.gov.ua/plan-upravlinnya-richkovim-basejnom-dunayu1.

поздовжніми профілями. Ці водотоки швидко реагують на випадання опадів або сніготанення, забезпечуючи стрімке підняття рівнів у головній річці. У передгірній і рівнинній частинах басейну густота річкової мережі поступово зменшується, а самі малі водотоки мають менші похили та повільніший водообмін із головним руслом. Ця відмінність у структурі гідрографічної мережі є одним із чинників, що визначає різний характер формування паводкової хвилі на різних ділянках Пруту – різку й короткочасну у верхів'ях та відносно пологішу, розтягнуту в часі в середній і нижній течії.

Суттєве значення для морфодинаміки річища має також режим твердого стоку, тобто кількість і фракційний склад наносів, що транспортуються потоком. У гірській частині басейну переважає донний твердий стік, представлений крупноуламковим матеріалом, тоді як у міру просування вниз за течією зростає частка завислих наносів дрібнішої фракції. Зміна співвідношення донного й завислого стоку відображається на морфології русла, оскільки ділянки з переважанням донного транспорту наносів схильні до формування рухливих гальково-гравійних форм і частих локальних перебудов дна, тоді як на ділянках із переважанням завислих наносів активніше відбувається акумуляція на заплаві під час повеней і формування прируслових валів.

Гідрологічний режим Пруту є переважно дощово-сніговим із вагомою роллю паводків теплого періоду. Для річки характерні весняне водопілля, літні дощові паводки, а також підвищений зимовий стік у періоди відлиг і дощів[9]. Офіційні матеріали Плану управління річковим басейном Дунаю на 2025–2030 роки для суббасейнів Пруту та Сірету підкреслюють, що підвищена зливова діяльність на північно-східних схилах Карпат є однією з головних причин частих паводків, а карпатські притоки мають великі похили, скелясто-валунне й галечникове ложе та умови, сприятливі для швидкого поверхневого стоку[10]. Правовою основою реалізації цього плану є відповідне розпорядження Кабінету Міністрів України[11]. Для морфодинаміки русла це означає, що найбільші зміни планового положення берегових ліній і руслових форм слід очікувати

[9] Гребінь В. В. Прут // Енциклопедія сучасної України / редкол.: І. М. Дзюба, А. І. Жуковський, М. Г. Железняк та ін. Київ : Інститут енциклопедичних досліджень НАН України, 2023. URL: https://esu.com.ua/article-879390.

[10] План управління річковим басейном Дунаю на 2025–2030 роки. Суббасейни Пруту та Сірету / Державне агентство водних ресурсів України. URL: https://davr.gov.ua/plan-upravlinnya-richkovim-basejnom-dunayu1.

[11] Про затвердження плану управління річковим басейном Дунаю на 2025–2030 роки : розпорядження Кабінету Міністрів України від 31.12.2024 № 1347-р // База даних «Законодавство України» / Верховна Рада України. URL: https://zakon.rada.gov.ua/go/1347-2024-%D1%80.

після проходження паводкових хвиль, особливо на ділянках із нестійкими алювіальними берегами, біля розгалужень русла, островів, старорічищ і в місцях контакту потоку з інженерно зміненими берегами.

Для оцінки гідрологічного режиму Пруту важливе значення має мережа спостережних постів, розташованих уздовж річки та на її основних притоках у межах гірської, передгірної та рівнинної ділянок. Дані багаторічних спостережень за рівнями й витратами води дають змогу простежити не лише сезонний хід стоку, а й довгострокові тенденції його змін, пов'язані з коливаннями кліматичних умов і антропогенним навантаженням на водозбір. Так, на українській ділянці річки діють п'ять гідрологічних постів (смт Ворохта, с. Татарів Надвірнянського р-ну, м. Яремче, м. Коломия, м. Чернівці)[12].

Порівняння гідрологічних характеристик на постах, розташованих у різних природних зонах басейну, дає змогу кількісно оцінити внесок гірської частини у формування паводкового стоку та простежити його трансформацію в міру просування хвилі паводка вниз за течією, що є важливою передумовою для інтерпретації синхронності чи запізнення руслових деформацій на різних ділянках річки.

Паводковий режим Пруту характеризується не лише сезонною, а й багаторічною мінливістю: роки з підвищеною кількістю опадів у гірській частині басейну супроводжуються серіями паводків, здатних спричиняти каскадні руслові переформування – коли наслідки однієї повені (наприклад, підмив берега чи утворення нового рукава) стають вихідними умовами для розвитку деформацій під час наступного високого стояння води. Такий кумулятивний характер руслової динаміки є однією з причин, чому дослідження планових переформувань Пруту доцільно проводити в багаторічному розрізі, залучаючи різночасові картографічні та дистанційні матеріали, а не лише за окремим станом на певну дату.

Геологічна та геоморфологічна основа басейну Пруту також зумовлює особливості руслових процесів. Гірська частина пов'язана з Карпатською складчастою областю, де поширені флішові товщі, пісковики, глинисті та мергелисті породи, а в долинах річок – четвертинні алювіальні щебеневі, галькові й піщано-галькові відклади[13]. У передгір'ях і на рівнинних територіях важливу роль відіграють терасові комплекси, алювіальні відклади заплави й надзаплавних терас. Саме вони формують літологічну

[12] Гребінь В. В. Прут // Енциклопедія сучасної України / редкол.: І. М. Дзюба, А. І. Жуковський, М. Г. Железняк та ін. Київ : Інститут енциклопедичних досліджень НАН України, 2023. URL: https://esu.com.ua/article-879390.

[13] Природа Українських Карпат / за ред. К. І. Геренчука. Львів : Вид-во Львівського ун-ту, 1968. 267 с.

основу сучасної долини і визначають стійкість берегів до розмиву. У зв'язку із цим Прут доцільно розглядати не лише як водотік, а як складну річково-долинну геосистему, у межах якої взаємодіють водний потік, алювіальні відклади, заплава, тераси, схили долини, рослинний покрив і господарське освоєння території.

Ґрунтовий покрив басейну Пруту закономірно змінюється відповідно до висотної поясності та літологічної будови території і опосередковано впливає на інтенсивність надходження продуктів схилової денудації до річкової мережі. У гірській частині переважають гірсько-лісові бурі та дерново-буроземні ґрунти, які на крутих схилах мають обмежену потужність і за порушення природного рослинного покриву легко піддаються площинному змиву та лінійній ерозії. У передгір'ї поширені дерново-підзолисті та ясно-сірі опідзолені ґрунти на лесоподібних суглинках, які через значну розораність території і недостатню протиерозійну облаштованість схилів є одним із джерел дрібнозернистого матеріалу, що надходить у русло Пруту та його допливів під час злив. На рівнинних ділянках Прут-Дністровського межиріччя домінують сірі лісові та чорноземні ґрунти, менш чутливі до площинної ерозії, однак їхнє інтенсивне сільськогосподарське використання посилює роль яружно-балкової ерозії на прилеглих до долини територіях[14].

Рослинність у басейні Пруту виконує важливу водорегулювальну й протиерозійну функцію. У гірській і передгірній частинах значні площі займають широколистяні та хвойні ліси; у передгір'ї поширені дубові, грабові й букові ліси, вище зростає роль бука, ялиці та ялини, а найвищі ділянки Карпат представлені субальпійськими луками й чагарниковими формаціями[15]. На рівнинних і лівобережних ділянках суббасейну, особливо в межах Прут-Дністровського межиріччя, природний рослинний покрив значною мірою трансформований сільськогосподарським використанням. Така зміна природної лісистості на відкриті й розорані землі впливає на поверхневий стік, ерозійні процеси, надходження наносів і стан прибережних захисних смуг.

Прибережна деревно-чагарникова рослинність заслуговує на окрему увагу як безпосередній морфологічний чинник. Смуги верболозів, вільхи та інших вологолюбних порід, що ростуть уздовж берегової лінії, механічно закріплюють ґрунт кореневою системою, зменшують швидкість течії у прибережній зоні та сприяють осіданню завислих наносів, формуючи природні прируслові вали. Там, де така рослинність

[14] Природа Чернівецької області / за ред. К. І. Геренчука. Львів : Вища школа, 1978. 160 с.

[15] Природа Українських Карпат / за ред. К. І. Геренчука. Львів : Вид-во Львівського ун-ту, 1968. 267 с.

вирубана або витіснена сільськогосподарським чи забудовним освоєнням берегів, спостерігається зниження стійкості берегової лінії до розмиву та пришвидшення бічної ерозії навіть за помірних витрат води. Це підтверджує тісний взаємозв'язок між станом рослинного покриву заплави та інтенсивністю планових деформацій русла[16].

Отже, річка Прут як об'єкт дослідження є гірсько-передгірно-рівнинною транскордонною річковою системою, що поєднує риси високогірного карпатського водотоку, передгірної річки з активним надходженням наносів і рівнинного русла з розвиненою заплавою. Її природна специфіка визначається положенням у межах Українських Карпат, Передкарпаття та Прут-Дністровського межиріччя, значною роллю зливового стоку, паводковістю, високою морфодинамічною активністю окремих ділянок і транскордонним водогосподарським значенням. Для дослідження планових переформувань русла Прут є показовим об'єктом, оскільки у його долині поєднуються природні чинники руслової динаміки та антропогенні впливи, зокрема освоєння заплави, берегоукріплення, транспортна інфраструктура й водогосподарське використання. Прут є однією з головних річкових систем південно-західної частини України та важливим елементом природної структури Українських Карпат, Передкарпаття і прилеглих рівнинних територій. Її геолого-геоморфологічні особливості визначаються положенням у межах кількох природних областей, які істотно відрізняються між собою за будовою рельєфу, літологічним складом порід, характером долин, похилами русла й умовами розвитку сучасних руслових процесів. Прут бере початок у високогірній частині Українських Карпат, у районі Чорногірського масиву, а далі перетинає гірські, передгірні та рівнинні території, що зумовлює значну просторову зміну морфології його долини та русла.

У геоморфологічному відношенні верхня частина басейну Пруту пов'язана з Українськими Карпатами. Ця територія характеризується складною тектонічною будовою, значним вертикальним розчленуванням рельєфу, великими відносними висотами, стрімкими схилами та переважанням ерозійно-денудаційних процесів. У межах Карпат рельєф сформований переважно на флішових товщах, що представлені чергуванням пісковиків, аргілітів, алевролітів, мергелів та інших осадових порід. Така літологічна основа в поєднанні з інтенсивним зволоженням, значними похилами й активною ерозійною діяльністю водотоків сприяє формуванню глибоко врізаних долин і високій динамічності руслових процесів[17].

[16] Природа Чернівецької області / за ред. К. І. Геренчука. Львів : Вища школа, 1978. 160 с.

[17] Природа Українських Карпат / за ред. К. І. Геренчука. Львів : Вид-во Львівського ун-ту, 1968. 267 с.

Чергування у флішовій товщі порід із різною стійкістю до вивітрювання і розмиву – твердих пісковиків та пластичних глинистих прошарків – зумовлює нерівномірність ерозійного врізання по довжині річища. На ділянках, де в основі русла оголюються більш стійкі пісковикові пачки, формуються локальні пороги й перекати, що виконують роль природних базисів ерозії для вищерозташованих відтинків долини. Натомість там, де в руслі переважають менш стійкі глинисто-мергелисті різновиди, спостерігається пришвидшене поглиблення й розширення річища. Така літологічна вибірковість ерозії є однією з причин нерівномірного поздовжнього профілю Пруту у верхній течії та формування чергування ерозійних і акумулятивних відтинків.

У верхній течії Прут має виразний гірський характер. Його долина тут переважно вузька, місцями ущелиноподібна, з крутими схилами, значними похилами русла та високою швидкістю течії. Русло складене переважно крупноуламковим матеріалом – валунами, галькою, гравієм, що надходять із гірських схилів і приток. Для цієї частини річки характерні активна глибинна ерозія, локальні руслові перебудови, переміщення донного матеріалу під час паводків, утворення порогів, перекатів і кам'янисто-галькових руслових форм. Обмеженість долини схилами зменшує можливості широкої бічної міграції русла, тому руслові процеси тут переважно пов'язані з вертикальним врізанням, локальним розмивом берегів і перебудовою руслового дна[18].

Нижче за течією, у межах Передкарпаття, геоморфологічні умови істотно змінюються. Річка виходить із гірської ділянки в передгірну смугу, де зменшуються похили, розширюється долина, змінюється характер алювіальних відкладів і посилюється роль акумулятивних процесів. Передкарпаття, описане у працях за редакцією К. І. Геренчука, є перехідною природною зоною між гірськими структурами Карпат і рівнинними територіями. Для нього характерне поєднання хвилястого й розчленованого рельєфу, терасованих долин, алювіальних рівнин і схилових форм, що виникли внаслідок тривалої взаємодії тектонічних, ерозійних та акумулятивних процесів[19].

На передгірних ділянках Пруту зростає значення бічної ерозії та акумуляції. Зменшення похилу русла призводить до часткового відкладання матеріалу, який переноситься з гірської частини басейну. У таких умовах формуються гальково-гравійні побочні, острови, коси, заплавні протоки, а русло може набувати ознак розгалуження. Саме перехід від гірських до

[18] Природа Українських Карпат / за ред. К. І. Геренчука. Львів : Вид-во Львівського ун-ту, 1968. 267 с.

[19] Природа Івано-Франківської області / за ред. К. І. Геренчука. Львів : Вища школа, 1973. 157 с.

передгірних умов часто є зоною підвищеної руслової динаміки, оскільки енергія потоку ще залишається значною, але транспортна здатність поступово зменшується. Це створює умови для чергування розмиву й акумуляції, зміни положення головного русла, утворення нестійких алювіальних форм і переформування заплави[20].

Розгалуженість русла на передгірних ділянках заслуговує на окремий коментар з погляду морфодинаміки. У багаторукавних відтинках потік розподіляється між кількома рукавами з різною пропускною здатністю, унаслідок чого частка витрати води в кожному з них може суттєво змінюватися залежно від фази водного режиму. У маловодні періоди другорядні рукави замулюються й заростають, тоді як у паводки саме вони нерідко приймають на себе основне навантаження і швидко розмиваються, перетворюючись на провідні русла. Такий перерозподіл витрат між рукавами є одним із головних механізмів планових переформувань річища на розгалужених ділянках Пруту і потребує систематичного моніторингу за різночасовими знімками.

У межах Чернівецької області Прут набуває рис передгірно-рівнинної річки. За природним районуванням територія області охоплює гірську частину Буковинських Карпат, Передгір'я та рівнинне Прут-Дністровське межиріччя. Долина Пруту тут є важливою геоморфологічною межею між різними природними комплексами. На північ від річки поширені рівнинні й хвилясті лісостепові території, а південніше простежується перехід до передгірних і гірських ландшафтів[21]. Така позиція Пруту зумовлює складну будову його долини, у якій поєднуються заплава, надзаплавні тераси, алювіальні рівнини, схилові ділянки та антропогенно трансформовані поверхні.

Геологічна будова долини Пруту в межах передгірних і рівнинних ділянок значною мірою представлена четвертинними алювіальними відкладами. Вони складають заплаву, руслові форми та терасові рівні. До їхнього складу входять галька, гравій, пісок, супіски й суглинки. Такі відклади мають різну стійкість до розмиву, що безпосередньо впливає на характер руслових процесів. Ділянки, складені пухкими піщано-гравійними та супіщаними відкладами, є більш вразливими до бічної ерозії, тоді як відтинки з більш стійкими берегами або штучним укріпленням мають обмежену рухливість. Унаслідок цього вздовж течії Пруту формуються ділянки з різною інтенсивністю руслових переформувань[22].

[20] Природа Івано-Франківської області / за ред. К. І. Геренчука. Львів : Вища школа, 1973. 157 с.
[21] Природа Чернівецької області / за ред. К. І. Геренчука. Львів : Вища школа, 1978. 160 с.
[22] Природа Чернівецької області / за ред. К. І. Геренчука. Львів : Вища школа, 1978. 160 с.

Важливим елементом геоморфологічної будови долини Пруту є заплава. Вона формується внаслідок періодичного затоплення, акумуляції алювію та міграції русла. У природних умовах заплава виконує важливу функцію простору, у межах якого річка може розсіювати енергію паводкового потоку, формувати нові руслові й заплавні форми, змінювати положення берегових ліній і підтримувати динамічну рівновагу системи «потік–русло–заплава». На ділянках, де заплава ширша і менш обмежена схилами або інженерними спорудами, можливості планового зміщення русла зростають. Там, де долина звужена або заплава зайнята забудовою, дорогами, дамбами чи берегоукріпленнями, природна динаміка русла обмежується.

У межах широкої заплави морфологічна різноманітність форм рельєфу є значно вищою, ніж у звужених ділянках долини. Тут трапляються прируслові вали, притерасні зниження, старорічища на різних стадіях заростання, гриви колишніх рукавів і локальні понижений мікрорельєф, що фіксують попередні положення русла. Аналіз просторового розташування цих форм дає змогу реконструювати напрямки й амплітуду історичної міграції річища навіть за відсутності повного набору різночасових карт, оскільки самі елементи рельєфу заплави є своєрідним «літописом» руслових деформацій[23].

Надзаплавні тераси Пруту відображають етапи врізання річки та зміну базису ерозії впродовж геологічного часу. Їхня наявність свідчить про складну історію формування долини, пов’язану із чергуванням фаз ерозії та акумуляції. У межах передгірних і рівнинних територій терасові комплекси мають важливе значення для розуміння розвитку долини, оскільки вони фіксують попередні рівні русла і заплави. Сучасне русло Пруту функціонує в межах наймолодшого алювіального комплексу, який є найбільш динамічним і найчутливішим до змін водності, паводкового режиму й антропогенного втручання[24].

З методологічного погляду для дослідження планових переформувань русла принципове значення має чітке розрізнення сучасного алювіального комплексу заплави, у межах якого відбуваються активні руслові деформації, і давніших терасових рівнів, що вже вийшли з-під безпосереднього впливу річки. Помилкове віднесення окремих ділянок надзаплавної тераси до діючої заплави і навпаки здатне суттєво спотворити оцінку інтенсивності

[23] План управління річковим басейном Дунаю на 2025–2030 роки. Суббасейни Пруту та Сірету / Державне агентство водних ресурсів України. URL: https://davr.gov.ua/plan-upravlinnya-richkovim-basejnom-dunayu1.

[24] Природа Українських Карпат / за ред. К. І. Геренчука. Львів : Вид-во Львівського ун-ту, 1968. 267 с.

бічної міграції русла за різночасовими матеріалами. Тому аналіз геолого-геоморфологічної будови долини, зокрема виділення меж заплави та терасових рівнів на основі польових і дистанційних даних, є необхідним підготовчим етапом перед безпосереднім картографуванням планових переформувань річища Пруту.

Геолого-геоморфологічні умови Пруту безпосередньо впливають на характер руслових процесів. У гірській частині переважають процеси глибинної ерозії, транспортування крупноуламкового матеріалу та локальної перебудови русла. У передгірній частині активізуються акумуляція, формування гальково-гравійних руслових форм, бічна ерозія і розгалуження русла. У рівнинних ділянках зростає роль меандрування, розвитку заплави, формування стариць, рукавів, побочнів і зон планового зміщення русла. Така послідовна зміна процесів уздовж течії є наслідком зменшення похилу, розширення долини, зміни складу наносів і поступового переходу від ерозійного до ерозійно-акумулятивного й акумулятивного типів руслового розвитку.

Наведена поздовжня зональність типів руслового процесу узгоджується із загальновизнаною в річковій геоморфології концепцією поздовжнього профілю рівноваги, згідно з якою річка прагне виробити такий поздовжній профіль, за якого енергія потоку врівноважується опором ложа й транспортованим матеріалом. Для Пруту ця рівновага постійно порушується як природними чинниками – нерівномірністю літологічної будови, паводковою активністю, так і антропогенними – регулюванням стоку, вилученням алювію, спорудженням берегоукріплень, що в кожному конкретному випадку зумовлює локальне посилення або послаблення ерозійних чи акумулятивних процесів.

Клімат басейну річки Прут формується під впливом його положення в межах Українських Карпат, Передкарпаття та прилеглих рівнинних територій. Така просторова неоднорідність зумовлює значні відмінності температурного режиму, кількості атмосферних опадів, тривалості снігового покриву й умов формування поверхневого стоку. Загалом для басейну характерний помірно континентальний клімат, однак у гірській частині він набуває більш вологих і прохолодних рис, тоді як у передгірних і рівнинних районах стає теплішим і менш зволоженим.

Найважливішою кліматичною особливістю басейну Пруту є висотна диференціація кліматичних умов. У верхів’ях, у межах Чорногірського масиву та інших гірських територій Українських Карпат, зі збільшенням висоти знижується температура повітря, зростає кількість опадів, збільшується тривалість залягання снігового покриву та посилюється роль снігового живлення річок. Саме гірська частина басейну є основною

зоною формування стоку Пруту, оскільки тут випадає найбільша кількість опадів і створюються умови для швидкого стікання води по крутих схилах і густій річковій мережі[25].

У передгірній частині басейну кліматичні умови мають перехідний характер. Тут ще зберігається значний вплив Карпат, зокрема підвищена кількість опадів і часті дощові паводки, однак температурний режим є м'якшим, а тривалість снігового покриву меншою, ніж у гірській частині. Передкарпаття виступає зоною, де водний стік, сформований у горах, поєднується з місцевим поверхневим стоком. Унаслідок цього на передгірних ділянках Пруту часто посилюється паводкова активність, що має безпосередній вплив на руслові процеси, бічну ерозію та акумуляцію наносів[26].

У межах Чернівецької області клімат басейну Пруту поступово набуває більш рівнинних рис. На північ і північний схід від річки поширені лісостепові території Прут-Дністровського межиріччя, де порівняно з Карпатами вищі середні температури, менша кількість опадів і слабший вплив снігового живлення. Водночас близькість до передгір'я зумовлює збереження паводкової небезпеки, особливо у випадках інтенсивних дощів у гірській частині басейну. Тому навіть рівнинні ділянки Пруту можуть зазнавати різких коливань рівнів води внаслідок проходження паводкових хвиль, сформованих у Карпатах[27].

Режим атмосферних опадів є одним із головних чинників формування стоку Пруту. Для басейну характерне поєднання снігового та дощового живлення, однак провідну роль у формуванні високих витрат води часто відіграють дощові паводки теплого періоду. Інтенсивні зливи в гірській і передгірній частинах басейну спричиняють швидке підняття рівнів води, збільшення швидкості течії та активізацію транспорту наносів. У таких умовах посилюється розмив берегів, переміщення гальково-гравійного матеріалу, перебудова перекатів, кіс, островів і заплавних проток. Саме тому кліматичний чинник безпосередньо пов'язаний із розвитком руслових процесів Пруту.

Окремої уваги заслуговує тенденція до зміни характеру опадів у контексті загальних кліматичних змін останніх десятиліть, яка простежується для більшості річкових басейнів Карпатського регіону: зростання частки зливових опадів високої інтенсивності на тлі загального перерозподілу річної кількості опадів. Для морфодинаміки Пруту це потенційно означає почастішання короткочасних, але потужних

[25] Природа Українських Карпат / за ред. К. І. Геренчука. Львів : Вид-во Львівського ун-ту, 1968. 267 с.
[26] Природа Івано-Франківської області / за ред. К. І. Геренчука. Львів : Вища школа, 1973. 157 с.
[27] Природа Чернівецької області / за ред. К. І. Геренчука. Львів : Вища школа, 1978. 160 с.

паводкових хвиль, здатних спричиняти різкі одноактні зміни конфігурації русла, на відміну від повільнішої трансформації річища під впливом тривалих помірних водопіль. Цей чинник доцільно враховувати під час інтерпретації різночасових картографічних матеріалів, оскільки окремі значні переформування русла можуть бути наслідком поодиноких подій, а не поступової еволюції.

Сніговий покрив також має важливе значення для гідрологічного режиму річки. У гірській частині басейну він формується раніше, утримується довше і має більшу водність, ніж у передгірних і рівнинних районах. Весняне танення снігу сприяє підвищенню водності Пруту, однак найбільш небезпечні ситуації виникають тоді, коли сніготанення поєднується з дощами. У таких випадках зростає імовірність формування високих вод і паводків, здатних спричиняти активні руслові переформування[28].

Клімат басейну Пруту впливає не лише на водність річки, а й на стан схилів, ґрунтово-рослинного покриву та інтенсивність ерозійних процесів. У гірських районах значна кількість опадів, круті схили та зливовий характер дощів сприяють розвитку поверхневого змиву й надходженню уламкового матеріалу до руслової мережі. У передгірних і рівнинних районах важливу роль відіграє ступінь зволоження ґрунтів, стан прибережної рослинності та характер землекористування. За умов надмірного зволоження або після тривалих дощів береги стають менш стійкими до розмиву, що підсилює бічну ерозію під час підвищених витрат води[29].

Кліматична поясність басейну Пруту тісно пов'язана з поширенням рослинних формацій, які, зі свого боку, впливають на водорегулювальні властивості території. У найвологіших і найхолодніших верхніх поясах Карпат, де випадає максимальна кількість опадів, переважає ялиновий і ялицево-буковий ліс, здатний затримувати значну частину атмосферних опадів кронами й підстилкою, уповільнюючи їх надходження до річкової мережі. У міру зниження висоти та зменшення зволоження в передгір'ї ліси поступаються місцем лучним і сільськогосподарським угіддям зі значно нижчою водорегулювальною здатністю, а в рівнинній частині басейну природний рослинний покрив майже повністю замінений орними землями. Ця узгоджена зміна клімату й рослинності вздовж висотного профілю басейну є одним із головних чинників, що визначає закономірне посилення нерівномірності поверхневого стоку і, відповідно, паводкової активності в напрямку від верхів'їв до передгірних і рівнинних ділянок Пруту.

---

[28] План управління річковим басейном Дунаю на 2025–2030 роки. Суббасейни Пруту та Сірету / Державне агентство водних ресурсів України. URL: https://davr.gov.ua/plan-upravlinnya-richkovim-basejnom-dunayu1.

[29] Природа Івано-Франківської області / за ред. К. І. Геренчука. Львів : Вища школа, 1973. 157 с.

Отже, клімат басейну річки Прут є одним із визначальних чинників формування її гідрологічного режиму та руслової динаміки. Найбільше значення мають висотна зміна температур і опадів, значна зволоженість гірської частини, снігове живлення у верхів'ях, інтенсивні дощі теплого періоду та паводковий характер стоку. Саме поєднання гірських, передгірних і рівнинних кліматичних умов зумовлює нерівномірність водного режиму Пруту та створює передумови для активних руслових процесів, особливо під час проходження паводкових хвиль.

Ландшафтна структура басейну річки Прут відзначається значною різноманітністю, що зумовлено його положенням у межах Українських Карпат, Передкарпаття та прилеглих рівнинних територій. Басейн охоплює природні комплекси, які істотно відрізняються між собою за рельєфом, геологічною будовою, кліматичними умовами, ґрунтово-рослинним покривом, ступенем зволоження та характером господарського використання. Саме тому ландшафти басейну Пруту доцільно розглядати в напрямку від гірських верхів'їв до передгірних і рівнинних ділянок, де поступово змінюються природні умови та характер взаємодії річки з прилеглими територіями.

У верхній частині басейну Прут формується в межах високогірних і середньогірних ландшафтів Українських Карпат. Для цих територій характерні значні абсолютні й відносні висоти, глибоке ерозійне розчленування, круті схили, висока зволоженість і добре виражена висотна поясність природних комплексів. У ландшафтній структурі переважають гірсько-лісові комплекси, а в найвищих частинах – субальпійські та альпійські луки. Лісові ландшафти виконують важливу водорегулювальну, ґрунтозахисну та протиерозійну функцію, оскільки впливають на інфільтрацію опадів, затримання поверхневого стоку і зменшення інтенсивності схилової ерозії.

Гірські ландшафти верхнього басейну Пруту мають важливе значення для формування водності річки. Саме тут випадає значна кількість атмосферних опадів, формується сніговий покрив і виникають умови для швидкого поверхневого стоку під час інтенсивних дощів або сніготанення. Поєднання крутих схилів, густої річкової мережі та значного зволоження сприяє активному надходженню води й уламкового матеріалу до русла. Це визначає високу енергію потоку у верхній течії Пруту та впливає на транспортування наносів, формування гальково-валунного русла, розвиток перекатів, порогів і локальних зон розмиву[30].

[30] Природа Українських Карпат / за ред. К. І. Геренчука. Львів : Вид-во Львівського ун-ту, 1968. 267 с.

Нижче за течією гірські ландшафти поступово змінюються передгірними. Передкарпаття виступає перехідною смугою між Карпатами та рівнинними територіями. Для нього характерні хвилясті й горбисті поверхні, терасовані долини, поширення алювіальних і делювіальних відкладів, поєднання лісових, лучних і сільськогосподарських ландшафтів. У межах цієї частини басейну Пруту значно зростає роль освоєних територій, населених пунктів, транспортної інфраструктури та сільськогосподарських угідь. Природні ландшафти тут істотно трансформовані, однак вони й надалі зберігають важливе значення для регулювання поверхневого стоку й умов розвитку руслових процесів.

Передгірні ландшафти є особливо важливими з погляду взаємодії річки з долиною. У цій частині басейну зменшується похил русла, розширюється долина, збільшується площа заплавних і терасових поверхонь, а річка отримує більше простору для бічної міграції. Саме тут частіше формуються гальково-гравійні побочні, острови, коси, рукави та заплавні протоки. Ландшафтні умови Передкарпаття сприяють чергуванню ерозійних і акумулятивних процесів, що має безпосереднє значення для дослідження планових переформувань русла Пруту[31].

У межах Чернівецької області басейн Пруту охоплює гірські, передгірні та рівнинні ландшафти. За природними особливостями територія області поєднує Буковинські Карпати, Передгір'я та Прут-Дністровське межиріччя. Долина Пруту є важливою ландшафтною межею, оскільки відділяє північніші рівнинні лісостепові комплекси від передгірних і гірських територій на південному заході. У цьому полягає одна з головних природних особливостей Пруту: річка не лише формує власну долинно-заплавну систему, а й проходить через території з різною ландшафтною структурою[32].

Природна цінність долинних ландшафтів Пруту зумовлює наявність у його межах об'єктів природно-заповідного фонду різних категорій – від локальних заказників і пам'яток природи до ділянок, що входять до складу ширших природоохоронних територій регіону. Заплавні луки, старорічища, ділянки природних заплавних лісів і чагарників виконують функцію екологічних коридорів, які підтримують міграцію та відтворення водно-болотних і навколоводних видів фауни, а також слугують місцями зростання вологолюбних рослинних угруповань. Наявність природоохоронного статусу окремих ділянок долини накладає додаткові обмеження на характер господарського використання прибережних територій і опосередковано

[31] Природа Івано-Франківської області / за ред. К. І. Геренчука. Львів : Вища школа, 1973. 157 с.
[32] Природа Чернівецької області / за ред. К. І. Геренчука. Львів : Вища школа, 1978. 160 с.

впливає на збереження природної морфодинаміки русла, оскільки на заповідних ділянках інженерне втручання в береги здебільшого відсутнє або суттєво обмежене.

Рівнинні ландшафти басейну Пруту, зокрема в межах Прут-Дністровського межиріччя, мають переважно лісостеповий характер. Тут поширені хвилясті межирічні рівнини, розчленовані балками й долинами малих водотоків, а значні площі зайняті сільськогосподарськими угіддями. Природна рослинність на цих територіях значною мірою змінена внаслідок тривалого землеробського освоєння. Це впливає на поверхневий стік, ерозійні процеси, надходження дрібнозему до річкової мережі та стан прибережних територій. На рівнинних ділянках особливо важливого значення набувають заплава Пруту, надзаплавні тераси, старорусловi зниження, заболочені й лучні ділянки, які є частиною сучасного долинного ландшафту[33].

Окремим елементом рівнинних і передгірних ділянок долини Пруту є заплавні водойми – стариці, притерасні озера й заболочені зниження, що виникають унаслідок відчленування колишніх рукавів русла під час його планових переформувань. Такі водойми проходять послідовні стадії розвитку – від активного рукава, з'єднаного з основним потоком, через поступове замулення й заростання водною рослинністю, до повного перетворення на заболочену або суху низину, помітну в рельєфі як дугоподібне зниження. Наявність у долині серії стариць різного віку й ступеня заростання є прямим морфологічним свідченням історичної мінливості положення русла і слугує додатковим джерелом інформації для реконструкції напрямків його планових переформувань за періоди, що передують наявним картографічним матеріалам.

Заплавні ландшафти Пруту є найдинамічнішою частиною басейнової ландшафтної системи. Вони формуються під впливом періодичного затоплення, акумуляції алювію, бічної міграції русла та зміни положення руслових форм. До них належать русло, острови, побочні, прируслові вали, заплавні протоки, стариці, лучні й чагарникові ділянки. У природному стані заплава виконує важливу водорегулювальну функцію: приймає частину паводкового стоку, зменшує енергію потоку, сприяє акумуляції наносів і підтримує різноманітність річково-долинних ландшафтів. Водночас саме заплава найбільше зазнає антропогенного впливу через забудову, розорювання, прокладання доріг, спорудження дамб і берегоукріплень[34].

---

[33] Природа Чернівецької області / за ред. К. І. Геренчука. Львів : Вища школа, 1978. 160 с.

[34] План управління річковим басейном Дунаю на 2025–2030 роки. Суббасейни Пруту та Сірету / Державне агентство водних ресурсів України. URL: https://davr.gov.ua/plan-upravlinnya-richkovim-basejnom-dunayu1.

Просторова конфігурація заплавних ландшафтів безпосередньо відображає історію планових переформувань русла. Тому за характером розташування стариць, лучних грив і чагарникових масивів можна простежити колишні положення потоку та реконструювати загальний вектор його багаторічної міграції в межах долини. У ділянках, де заплавні ландшафти збережені у природному або близькому до природного стані, річка має ширші можливості для саморегулювання – розсіювання енергії паводків, природного відновлення рослинного покриву на ділянках, звільнених від русла, і поступового «загоєння» ерозійних форм. Натомість фрагментація заплавних ландшафтів унаслідок господарського освоєння звужує простір для таких природних процесів і концентрує енергію потоку на обмежених ділянках берегової лінії, що часто підсилює локальну бічну ерозію.

Антропогенна трансформація ландшафтів басейну Пруту є важливим чинником сучасного розвитку річкової долини. У гірських і передгірних районах значення мають вирубування лісів, лісогосподарська діяльність, дорожнє будівництво та локальна забудова долин. У передгірних і рівнинних частинах посилюється роль сільськогосподарського освоєння, урбанізації, берегоукріплювальних робіт і зміни природної структури заплави. Такі зміни впливають на водний режим, ерозійні процеси, стійкість берегів і просторові можливості русла для природного саморегулювання.

Історію господарського освоєння долини річки відображає тривалий період. Це пояснюється тим, що приурочені до заплавних і надзаплавних терас родючі ґрунти здавна приваблювали населення для землеробства й поселенської діяльності, унаслідок чого значна частина долини в межах передгірних і рівнинних ділянок нині зайнята населеними пунктами, дорогами та сільськогосподарськими угіддями. У XX столітті додатковим чинником трансформації долини стало проведення масштабних меліоративних і берегоукріплювальних робіт, спрямованих на захист прилеглих земель і населених пунктів від паводків, а також видобування нерудних будівельних матеріалів безпосередньо з русла й заплави. Ці види діяльності, здійснювані здебільшого без урахування природної динаміки річища, у низці випадків призвели до порушення природного балансу наносів і посилення ерозійних процесів на ділянках, розташованих нижче за течією від місць інтенсивного антропогенного втручання[35].

Сукупний ефект антропогенних чинників у басейні Пруту проявляється по-різному, залежно від ділянки річки. У гірській частині основний вплив пов’язаний зі змінами умов формування поверхневого і схилового стоку

[35] Природа Чернівецької області / за ред. К. І. Геренчука. Львів : Вища школа, 1978. 160 с.

внаслідок лісогосподарської діяльності, що позначається передусім на паводковому режимі та надходженні уламкового матеріалу до русла. У передгірній і рівнинній частинах домінує пряме втручання в морфологію долини – спрямлення ділянок русла, зведення дамб і берегозахисних споруд, видобування піщано-гравійної суміші з русла й заплави. Кожен із цих видів впливу по-своєму змінює природний баланс ерозійно-акумулятивних процесів: одні втручання локально стабілізують берегову лінію, тоді як інші, навпаки, посилюють ерозію на суміжних, незахищених ділянках, переносячи проблему вниз або вгору за течією. Урахування цієї просторової неоднорідності антропогенного навантаження є необхідною умовою коректної інтерпретації виявлених планових переформувань русла Пруту.

Таким чином, ландшафти басейну річки Прут мають складну висотно-поясну та просторову структуру. У верхів'ях переважають гірські лісові та високогірні ландшафти, у середній частині передгірні ерозійно-акумулятивні комплекси, а в нижчих ділянках української частини басейну – рівнинні лісостепові, заплавні й терасові ландшафти. Така різноманітність визначає відмінності у формуванні стоку, надходженні наносів, розвитку ерозійних і акумулятивних процесів, а також у характері руслових переформувань. Для дослідження річки Прут особливе значення мають заплавно-руслові ландшафти, оскільки саме в їхніх межах найвиразніше проявляється взаємодія водного потоку, алювіальних відкладів, рослинності та господарського освоєння долини.

Узагальнюючи викладене, зазначимо, що фізико-географічні умови басейну річки Прут – його геологічна й геоморфологічна будова, кліматичний режим, ландшафтна структура та рослинний покрив – формують цілісний природний комплекс, у межах якого гірські, передгірні й рівнинні чинники діють узгоджено, визначаючи просторову та часову нерівномірність руслових процесів. Це підтверджує доцільність комплексного, ландшафтно-геоморфологічного підходу до подальшого аналізу планових деформацій русла Пруту, який враховує не лише безпосередньо гідрологічні характеристики потоку, а й увесь спектр природних та антропогенних чинників, що діють у межах річково-долинної геосистеми.

Окремо потрібно нагадати, що руслові процеси – це сукупність змін морфологічної будови русла, його планового положення, поздовжнього та поперечного профілю, берегових ліній, заплавно-руслових форм і співвідношення ерозійно-акумулятивних процесів у часі. У руслознавстві ці зміни розглядаються як зовнішній прояв руслового процесу, тобто взаємодії водного потоку, наносів, геологічної будови долини, рельєфу,

рослинності та антропогенних чинників. Річкове русло не є сталою формою рельєфу: воно постійно саморегулюється відповідно до водності, кількості й гранулометричного складу наносів, похилу долини, стійкості берегів та змін базису ерозії. Саме тому руслові переформування доцільно розглядати не як випадкові зміни берегової лінії, а як закономірний процес розвитку річкової системи[36].

Формування уявлень про руслові процеси як предмет самостійного наукового напряму – руслознавства, пройшло тривалий шлях розвитку, у якому можна виділити описовий, гідравлічний і сучасний геосистемний етапи. На описовому етапі увага дослідників зосереджувалася переважно на фіксації видимих змін берегової лінії та класифікації руслових форм. Гідравлічний етап увів у науковий обіг кількісні характеристики потоку – швидкість течії, витрати води й наносів, дотичну напругу – як основу пояснення механізмів ерозії та акумуляції; помітну роль у його становленні відіграли і класичні праці західної флювіальної геоморфології. Сучасний геосистемний етап, представлений передусім працями О. Г. Ободовського, Ю. С. Ющенка та їхніх послідовників, розглядає руслові процеси в нерозривному зв'язку із ширшою річково-долинною геосистемою, охоплюючи не лише саме русло, а й заплаву, тераси, водозбір і характер його господарського освоєння.

У працях О. Г. Ободовського, зокрема присвячених гідролого-екологічній оцінці руслових процесів[37], вони трактуються як результат взаємодії водного потоку з руслом, унаслідок чого відбуваються розмив, транспортування й акумуляція наносів, формування перекатів, плес, островів, кіс, бокових і серединних побочнів, рукавів, заплавних проток та інших морфологічних елементів[38]. Важливим у цьому підході є поєднання гідрологічної та гідроморфологічної оцінки, де руслоформування залежить не лише від величини витрат води, а й від здатності потоку переміщувати тверді частинки, перебудовувати руслові форми та змінювати конфігурацію русла. Тому під час аналізу руслових переформувань належить враховувати руслоформувальні витрати води, паводковий режим, стійкість русла, морфологічний тип русла, характер наносів і ступінь господарської трансформації долини.

Професор Ю. С. Ющенко розглядає розвиток русел у межах геогідроморфологічного підходу, де русло є не ізольованим водним

[36] Ободовський О. Г. Руслові процеси : підручник. Київ : Київський університет, 2017. 495 с.

[37] Ободовський О. Г. Гідролого-екологічна оцінка руслових процесів : на прикладі річок України. Київ : Ніка-Центр, 2001. 274 с.

[38] Ободовський О. Г. Руслові процеси : підручник. Київ : Київський університет, 2017. 495 с.

об'єктом, а складовою річково-долинної геосистеми[39]. У цьому підході особливе значення має поняття самоформування русел, тобто здатності річкового потоку створювати й перебудовувати власну морфологічну структуру відповідно до природних умов.

Руслові переформування в такому розумінні є не лише гідравлічним явищем, а й просторово-географічним процесом, що відображає зв'язок між водним потоком, долиною, заплавою, терасами, молодими алювіальними поверхнями та антропогенними елементами долинного ландшафту. Саме тому в дослідженнях Ю. С. Ющенка, М. Д. Пасічника та інших науковців важливе місце посідає аналіз територіальної структури річкових долин, однорідних ділянок русла і заплави та молодих річкових ландшафтів, а також територіальної структури умов і проявів руслоформування річок загалом[40]. Аналогічний підхід застосовано і в регіональних монографічних дослідженнях руслових процесів окремих карпатських річок, зокрема Латориці[41], а закономірності руслоформування безпосередньо в річковій системі Верхнього Пруту докладно розкрито в окремому дисертаційному дослідженні[42].

У межах геогідроморфологічного підходу молодий річковий ландшафт розглядається як просторово-часова одиниця, що об'єднує русло та прилеглу активну заплаву в межах спільної історії формування впродовж останнього, найдинамічнішого етапу розвитку долини. На відміну від суто гідравлічного трактування, що обмежується аналізом власне водного потоку, геогідроморфологічний підхід дає змогу враховувати весь комплекс територіальних умов і проявів руслоформування – від літологічної будови долини й характеру рослинного покриву до інтенсивності господарського освоєння конкретної ділянки. Це робить його придатним інструментом саме для комплексного дослідження планових переформувань русла Пруту, оскільки дозволяє поєднати аналіз власне морфологічних змін річища з ширшим ландшафтним контекстом, у якому ці зміни відбуваються[43].

---

[39] Ющенко Ю. С. Геогідроморфологічні закономірності розвитку русел. Чернівці : Рута, 2005. 320 с.

[40] Ющенко Ю. С., Кирилюк А. О., Костенюк Л. В., Опеченик В. М., Паланичко О. В., Пасічник М. Д. Територіальна структура умов та проявів руслоформування річок. *Фізична географія та геоморфологія*. 2012. Вип. 2 (66). С. 72–79.

[41] Латориця: гідрологія, гідроморфологія, руслові процеси : монографія / О. Г. Ободовський, В. В. Онищук, З. В. Розлач та ін. ; за ред. О. Г. Ободовського. Київ : ВПЦ «Київський університет», 2012. 319 с.

[42] Костенюк Л. В. Закономірності руслоформування у річковій системі Верхнього Пруту : автореф. дис. … канд. геогр. наук : 11.00.07. Чернівці, 2012. 20 с.

[43] Ющенко Ю. С. Геогідроморфологічні закономірності розвитку русел. Чернівці : Рута, 2005. 320 с.

За характером прояву руслові переформування поділяють на планові, вертикальні та внутрішньоруслові. Планові переформування охоплюють зміни положення русла в горизонтальній площині: міграцію меандрів, розмив увігнутих берегів, наростання алювію на опуклих берегах, зміщення головного русла, утворення або відмирання рукавів, прориви шийок меандрів, формування стариць і зміни ширини багаторічної смуги руслоформування. Саме планові зміни найкраще фіксуються за різночасовими картами, аерофотознімками, супутниковими знімками та результатами ГІС-аналізу. Вертикальні переформування пов'язані з врізанням або підняттям дна русла, зміною глибини потоку, перебудовою поздовжнього профілю, розвитком ерозійних уступів і трансформацією рівня взаємодії русла із заплавою. Внутрішньоруслові переформування стосуються переміщення перекатів, плес, побочнів, руслових гряд, островів і локальних зон розмиву та акумуляції[44].

Тісно пов'язаною з наведеною класифікацією є типологія руслових форм за морфологічним рисунком, яка традиційно виділяє прямолінійні, звивисті (меандруючі) та розгалужені (багаторукавні) типи русел, а також перехідні форми між ними. Прямолінійні відтинки русла трапляються здебільшого на коротких ділянках і зазвичай є нестійкими: за відсутності жорсткого геологічного контролю потік у них поступово формує первинні вигини, які згодом розвиваються в меандри. Звивисте русло характеризується закономірним чергуванням плесів і перекатів, розмивом угнутих і намивом опуклих берегів, унаслідок чого відбувається поступове збільшення кривизни закрутів аж до їх природного прориву. Розгалужене русло формується там, де надходження наносів перевищує транспортну здатність потоку за одночасно значної ширини долини, що є типовим саме для передгірних ділянок гірських річок, зокрема Пруту нижче виходу з гірської частини басейну.

Кількісною характеристикою планової форми русла є коефіцієнт звивистості (сінуозності) – відношення довжини русла на певній ділянці до довжини відповідного відтинка долини. Русла з коефіцієнтом, близьким до одиниці, вважаються практично прямолінійними, тоді як зростання цього показника свідчить про розвиток меандрування. Для гірських річок коефіцієнт звивистості зазвичай є невисоким через жорсткий контроль долини схилами, тоді як на передгірних і рівнинних ділянках, де річка отримує простір для вільного розвитку вигинів, він може суттєво зростати[45].

---

[44] Ющенко Ю. С., Пасічник М. Д., Паланичко О. В., Вудвуд М. М., Закревський О. В. Природний територіальний устрій ландшафту р. Прут в межах Чернівецької області, його антропогенні трансформації та особливості функціонування системи потік – русло – заплава. *Науковий вісник Чернівецького університету. Серія: Географія*. 2023. Вип. 845. С. 41–51.

[45] Ободовський О. Г., Ярошевич О. Є. Гідроморфологічна оцінка якості річок басейну Верхньої Тиси / за ред. О. Г. Ободовського. Київ : Інтертехнодрук, 2006. 70 с.

Відстеження зміни коефіцієнта звивистості на конкретній ділянці Пруту за різночасовими картографічними матеріалами є одним із практичних інструментів кількісної оцінки інтенсивності планових переформувань.

У міжнародній флювіальній геоморфології подібні положення розвинуті в працях Л. Леопольда, М. Волмана, Дж. Міллера та С. Шумма[46]. Згідно з їхнім підходом, річкова система функціонує як відкрита динамічна система, у якій форма русла залежить від співвідношення водного стоку, стоку наносів, похилу, ширини та глибини русла, шорсткості, стійкості берегів і часових масштабів змін. Будь-яке порушення рівноваги – збільшення паводковості, зменшення надходження наносів, видобуток алювію, будівництво берегоукріплень або мостових переходів – може спричинити морфологічну перебудову русла. Ця перебудова проявляється або у врізанні, або в акумуляції, або в зміні планового рисунка русла.

У цьому контексті важливим є поняття потужності потоку (stream-power), яке відображає здатність течії виконувати роботу з розмиву та транспортування наносів і визначається як добуток витрати води, похилу русла та питомої ваги води, віднесений до одиниці довжини або ширини русла. Ділянки з підвищеною питомою потужністю потоку – зазвичай звужені відтинки долини з великими похилами – характеризуються переважанням ерозійних процесів, тоді як ділянки зі зниженою потужністю, де долина розширюється, а похил зменшується, є зонами переважної акумуляції[47]. Саме закономірна зміна потужності потоку вздовж поздовжнього профілю Пруту, від гірської до рівнинної частини басейну, багато в чому пояснює послідовну зміну домінантних типів руслового процесу, описану в цьому дослідженні.

Для гірських і передгірних річок, до яких належить Прут у верхній та середній течії, руслові переформування мають підвищену інтенсивність. Це зумовлено великими похилами, високою енергією потоку під час паводків, значним надходженням гальково-валунного матеріалу, нестійкістю берегів і різкою зміною гідравлічних умов на переході від гірських до передгірних і рівнинних ділянок. У таких умовах русло може швидко змінювати ширину, рукавність, положення головного потоку, конфігурацію островів і заплавних проток. Для річок Передкарпаття характерним є поєднання природної морфодинамічної активності з антропогенним впливом: видобутком руслового алювію, регулюванням берегів, будівництвом мостів, дамб, водозахисних споруд, зміною землекористування в заплаві[48].

---

[46] Leopold L. B., Wolman M. G., Miller J. P. Fluvial Processes in Geomorphology. San Francisco : W. H. Freeman and Company, 1964. 522 p.

[47] Lane E. W. The Importance of Fluvial Morphology in Hydraulic Engineering. *Proceedings of the American Society of Civil Engineers*. 1955. Vol. 81. Paper 745. P. 1–17.

[48] Руслові процеси річки Лімниця : монографія / О. Г. Ободовський, В. В. Онищук, В. В. Гребінь та ін. ; за ред. О. Г. Ободовського. Київ : Ніка-Центр, 2010. 256 с.

Розгалужені (багаторукавні) відтинки річища заслуговують на окремий коментар, оскільки саме вони є найбільш морфологічно нестійкими серед усіх типів русел. У межах такого відтинка потік розподіляється на кілька рукавів різної провідності, розділених островами й побочнями, складеними рухливим гальково-гравійним матеріалом. Розподіл витрат між рукавами залежить від фази водного режиму: у межень другорядні рукави можуть майже пересихати й заростати рослинністю, тоді як під час паводків саме вони нерідко концентрують основний потік, швидко поглиблюючись і перебираючи на себе функцію головного русла. Такий перерозподіл є одним із класичних механізмів раптової планової перебудови річища на розгалужених ділянках і потребує систематичного зіставлення різночасових знімків для коректної фіксації[49].

У дослідженнях річки Прут у межах Чернівецької області руслові переформування доцільно аналізувати через систему «потік – русло – заплава». Такий підхід дає змогу оцінювати не лише зміни лінії русла, а й ширину багаторічної смуги руслоформування, стан заплави, ступінь збереження природної рукавності, наявність антропогенного врізання та зміну взаємодії русла із заплавними поверхнями. Основною операційною одиницею такого аналізу можуть виступати однорідні ділянки русла й заплави річки, на основі яких виділяються молоді річкові ландшафти. Це важливо для практичного дослідження, оскільки руслові переформування не є однаковими вздовж усієї течії. На одних ділянках домінує бічна ерозія, на інших – акумуляція, на третіх – антропогенне стиснення русла, а на окремих відтинках спостерігається поєднання кількох процесів.

Виділення однорідних ділянок русла і заплави передбачає групування суміжних відтинків річища за подібністю провідних морфодинамічних характеристик – типу руслового процесу, ступеня стійкості берегів, ширини багаторічної смуги руслоформування та рівня антропогенного навантаження. Межі між такими ділянками зазвичай приурочені до природних чи антропогенних рубежів: місць впадання значних приток, ділянок зі зміною літологічної будови берегів, мостових переходів, гідротехнічних споруд або меж населених пунктів. Застосування цього підходу до Пруту в межах Чернівецької області дає змогу перейти від суцільного, недиференційованого аналізу річища до порівняльної оцінки конкретних відтинків, що суттєво підвищує точність виявлення закономірностей планових переформувань русла[50].

---

[49] Паланичко О. В. Закономірності руслоформування річок Передкарпаття : автореф. дис. … канд. геогр. наук : 11.00.07. Київ, 2010. 22 с.

[50] Ющенко Ю. С., Пасічник М. Д., Паланичко О. В., Вудвуд М. М., Закревський О. В. Природний територіальний устрій ландшафту р. Прут в межах Чернівецької області, його антропогенні трансформації та особливості функціонування системи потік – русло – заплава. *Науковий вісник Чернівецького університету. Серія: Географія*. 2023. Вип. 845. С. 41–51.

Підводячи проміжний підсумок, зазначимо, що руслові переформування річок – це просторово-часові зміни морфології русла, які виникають унаслідок взаємодії водного потоку, наносів, рельєфу долини, геологічної будови, рослинності й антропогенної діяльності. Для дослідження Пруту найбільш доцільним є поєднання класичного руслознавчого підходу, представленого працями О. Г. Ободовського, Леопольда і Шумма, з геогідроморфологічним та ландшафтно-гідроморфологічним підходом Ю. С. Ющенка, М. Д. Пасічника, О. В. Паланичко, Л. В. Костенюк та інших науковців-гідрологів. Саме таке поєднання дає змогу розглядати руслові переформування не лише як зміну берегової лінії, а як комплексну трансформацію молодого річкового ландшафту, заплавно-руслової системи та багаторічної смуги руслоформування.

Відомо, що руслові процеси формуються під впливом комплексу взаємопов'язаних природних і антропогенних чинників. Їх не можна пояснити лише величиною витрат води або формою русла, оскільки русло річки є результатом постійної взаємодії водного потоку, наносів, геологічної будови долини, рельєфу, рослинності, кліматичних умов і господарської діяльності людини. У руслознавстві русло розглядається як динамічна система, що реагує на зміну водності, твердого стоку, похилу, стійкості берегів і зовнішніх обмежень. Якщо змінюється хоча б один із цих елементів, річкова система поступово або різко перебудовується, що проявляється в бічному зміщенні русла, врізанні, акумуляції наносів, утворенні островів, розгалуженні русла, відмиранні рукавів або зміні ширини багаторічної смуги руслоформування[51].

Одним із головних факторів руслових процесів є гідрологічний режим річки. Витрати води, їх сезонна мінливість, повторюваність паводків, тривалість високих рівнів води та швидкість проходження паводкових хвиль безпосередньо визначають енергію потоку і його здатність виконувати ерозійну, транспортну й акумулятивну роботу. Найбільший вплив на русло мають не середні витрати води, а руслоформувальні витрати, здатні переміщувати донні наноси, розмивати береги, перебудовувати перекати, острови, коси та заплавні протоки. У періоди маловоддя русло здебільшого зберігає вже сформовану морфологічну структуру, тоді як під час паводків відбувається активне переміщення наносів, зміна положення головного потоку та переформування берегових ліній.

Поняття руслоформувальних витрат води є одним із центральних у методології руслознавства, оскільки саме воно дає змогу відокремити ту частину гідрологічного режиму, яка безпосередньо відповідає за морфологічну перебудову русла від решти водного режиму, що

[51] Ободовський О. Г. Руслові процеси : підручник. Київ : Київський університет, 2017. 495 с.

на морфологію практично не впливає. У руслознавчій традиції руслоформувальними зазвичай вважають витрати, близькі до тих, що заповнюють русло до рівня берегів (тобто відповідають витратам, які річка переповнює на заплаву), оскільки саме за таких умов дотична напруга потоку на дно й береги є максимальною, а сумарна робота з транспортування наносів за багаторічний період – найбільшою. Визначення величини руслоформувальних витрат для конкретних ділянок Пруту є необхідною передумовою для коректного зіставлення інтенсивності виявлених планових деформацій із гідрологічними умовами їх формування[52].

Для Пруту гідрологічний чинник має особливе значення через гірсько-передгірний характер значної частини басейну. У верхній і середній течії річка та її карпатські притоки реагують на інтенсивні дощі швидким підняттям рівнів води, збільшенням швидкості течії та різким зростанням транспортної здатності потоку. Саме паводкові події створюють умови для інтенсивного розмиву берегів, переміщення гальково-гравійного матеріалу, руйнування нестійких заплавних поверхонь і формування нових руслових форм. У межах передгірних і рівнинних ділянок Пруту паводковий імпульс поєднується зі збільшенням ширини долини, розвитком алювіальних відкладів і більшою свободою планового зміщення русла. Тому на таких ділянках можуть проявлятися не лише вертикальні зміни дна, а й активні планові переформування: зміщення меандрів, відокремлення стариць, утворення островів і рукавів, локальне розширення або звуження русла[53].

Додатковим ускладнювальним чинником для гідрологічного режиму Пруту є накладання паводкових хвиль, сформованих різними притоками басейну. Оскільки карпатські притоки мають різну площу водозбору, експозицію схилів і час добігання стоку, інтенсивна злива, що охоплює одразу кілька суміжних притокових басейнів, здатна спричинити практично одночасне надходження їхніх паводкових хвиль у головне русло Пруту. Таке накладання суттєво підвищує пікові витрати води порівняно із ситуацією, коли паводкові хвилі приток надходять розосереджено в часі, і, відповідно, підсилює морфодинамічний ефект окремої повені. Ця обставина є ще одним аргументом на користь аналізу руслових деформацій Пруту не лише у прив'язці до окремих гідрологічних постів на головній річці, а й з урахуванням синхронності паводкоутворення в межах усього басейну[54].

---

[52] Ободовський О. Г. Руслові процеси : підручник. Київ : Київський університет, 2017. 495 с.

[53] Ющенко Ю. С., Пасічник М. Д., Чернега П. І. Територіальна структура річкових долин. *Науковий вісник Чернівецького університету. Серія: Географія*. 2012. Вип. 612–613. С. 188–196.

[54] Гідроекологічне обґрунтування безпечного та збалансованого розвитку річкових природно-антропогенних систем Передкарпаття : монографія / Ю. С. Ющенко, О. М. Гончар, В. В. Григорійчук та ін. ; за ред. Ю. С. Ющенка. Чернівці : Чернівецький нац. ун-т ім. Ю. Федьковича, 2017. 472 с.

Важливим гідрологічним фактором є співвідношення рідкого і твердого стоку. Якщо водний потік має достатню енергію, але надходження наносів є обмеженим, річка може посилювати глибинну ерозію та врізатися в дно. Якщо ж надходження наносів перевищує транспортну здатність потоку, відбувається акумуляція, підвищення дна, формування побочнів, островів і розгалужених ділянок русла. У класичній флювіальній геоморфології це співвідношення пояснюється через рівновагу між витратою води, витратою наносів, похилом русла та розміром частинок донного матеріалу. Для гірсько-передгірних річок така рівновага є дуже нестійкою, оскільки під час сильних паводків транспортна здатність потоку може різко зростати, а після спаду води значна частина матеріалу відкладається у вигляді кіс, гравійних полів, островів і руслових гряд[55].

З ідеєю про рівновагу рідкого та твердого стоку тісно пов'язане явище поздовжнього сортування наносів у руслі. У верхів'ях Пруту, де потік має значну потужність, переважає крупноуламковий матеріал – валуни й груба галька, тоді як із просуванням вниз за течією і зменшення похилу відбувається поступове подрібнення й сортування наносів. При цьому більші фракції відкладаються раніше, а дрібніші – пісок, гравій – переносяться на значно більші відстані. Порушення цього природного сортувального процесу, наприклад унаслідок вилучення великих обсягів гальково-гравійної суміші на окремих ділянках, здатне змінити гранулометричний склад наносів нижче за течією, що опосередковано впливає на стійкість дна й берегів на цих відтинках.

Геологічні та геоморфологічні умови визначають просторові межі, у яких може розвиватися русло. До цієї групи чинників належать літологічний склад порід і алювіальних відкладів, тектонічна будова території, форма долини, похил русла, ширина заплави, наявність терас, стійкість берегів і характер контакту русла зі схилами долини. У гірських районах русло часто обмежене схилами, скельними виходами або вузькою долиною, тому можливості його планового зміщення менші, але вертикальна ерозія, переміщення крупноуламкового матеріалу та локальні руслові перебудови можуть бути дуже активними. У передгірних і рівнинних умовах, де долина ширша, а береги складені пухкими алювіальними відкладами, зростає роль бічної ерозії, меандрування, рукавності та заплавного переформування[56].

З геоморфологічного погляду ступінь обмеження русла долиною доцільно оцінювати через співвідношення ширини заплави до ширини

[55] Ободовський О. Г., Ярошевич О. Є. Гідроморфологічна оцінка якості річок басейну Верхньої Тиси / за ред. О. Г. Ободовського. Київ : Інтертехнодрук, 2006. 70 с.

[56] Ющенко Ю. С. Геогідроморфологічні закономірності розвитку русел. Чернівці : Рута, 2005. 320 с.

самого русла: чим воно більше, тим ширшим є простір, доступний для бічної міграції потоку, і тим імовірнішими є значні планові переформування впродовж багаторічного періоду. На вузьких, обмежених схилами відтинках долини це співвідношення близьке до одиниці, русло практично позбавлене можливості вільного зміщення, тоді як на широких передгірних і рівнинних ділянках воно може сягати кількох десятків, що створює простір для розвиненого меандрування чи розгалуження. Важливим є також поняття базису ерозії – рівня, до якого річка здатна врізатися на певній ділянці; його зміна, природна (наприклад, унаслідок тектонічних рухів) або антропогенна (унаслідок спорудження гребель чи поглиблення нижче розташованих відтинків), спричиняє хвилю регресивної ерозії, яка поширюється вгору за течією та може виявлятися у прискоренні як вертикальних, так і планових деформацій русла на значній відстані від первинного джерела порушення[57].

Для річок Передкарпаття геологічний і геоморфологічний чинники відіграють особливу роль через перехід від гірських до передгірних і рівнинних умов. На цьому переході змінюються похили, швидкість течії, характер наносів і будова долини. Потік, який у горах має високу енергію і здатний переносити крупний уламковий матеріал, на передгірних ділянках поступово втрачає частину транспортної здатності. Унаслідок цього активізується акумуляція, виникають гальково-гравійні руслові форми, острови, побочні та розгалуження. Водночас під час сильних паводків ці ж форми можуть швидко руйнуватися або переміщуватися вниз за течією. Саме тому для передгірних річок характерна значна морфологічна мінливість русла в часі[58].

У межах річкової долини важливу роль відіграє стійкість берегів. Вона залежить від складу відкладів, вологості ґрунтів, кореневої системи рослинності, висоти берегових уступів, наявності тріщин, підмиву основи берега та інтенсивності господарського використання прибережної смуги. Береги, складені гальково-піщаними, супіщаними або суглинистими відкладами, можуть швидко руйнуватися під час паводків, особливо якщо вони не закріплені природною рослинністю. Навпаки, ділянки з добре розвиненою прибережною деревно-чагарниковою рослинністю мають вищу опірність розмиву. Однак навіть рослинність не завжди стримує руслові процеси під час проходження високих паводків, коли потік підмиває основу берегового уступу і спричиняє обвалювання значних блоків заплавного матеріалу[59].

[57] Schumm S. A. The Fluvial System. New York : John Wiley & Sons, 1977. 338 p.

[58] Leopold L. B., Wolman M. G., Miller J. P. Fluvial Processes in Geomorphology. San Francisco : W. H. Freeman and Company, 1964. 522 p.

[59] Ободовський О. Г. Руслові процеси : підручник. Київ : Київський університет, 2017. 495 с.

У руслознавстві розрізняють два основні механізми руйнування берегів: безпосередній гідравлічний розмив, коли потік поступово вимиває частинки ґрунту з поверхні берегового укосу, і масові обвалення (гравітаційні механізми), де підмита водою нижня частина берегового уступу втрачає опору, а верхня, більш зв'язна частина берега (часто скріплена кореневою системою або пронизана тріщинами усихання) обвалюється у вигляді окремих блоків. Перший механізм переважає на пологих, слабозв'язних берегах, другий типовий для високих, крутих уступів, складених шаруватими алювіальними відкладами з прошарками різної щільності. Поєднання обох механізмів, що часто спостерігається під час проходження високих паводкових хвиль, здатне спричиняти значно швидше й масштабніше відступання берегової лінії, ніж дія кожного з механізмів окремо.

В окрему групу виділяють кліматичні чинники, що впливають на руслові процеси через режим опадів, температуру повітря, сніготанення, частоту злив і тривалість посушливих періодів. Для Пруту, як річки з карпатською частиною басейну, важливі інтенсивні дощі теплого періоду, поєднання дощових паводків із попереднім зволоженням ґрунтів, а також зимові й ранньовесняні відлиги. Збільшення повторюваності інтенсивних злив може підсилювати паводкову активність, збільшувати ерозійний потенціал потоку та сприяти швидшим плановим змінам русла. Водночас тривалі маловодні періоди можуть зменшувати активність руслових процесів, сприяти заростанню окремих рукавів, закріпленню побочнів і поступовому перетворенню частини руслових форм на заплавні поверхні.

Опосередкований вплив клімату на руслові процеси реалізується також через стан рослинного покриву водозбору. Тривалі посушливі періоди послаблюють трав'яний і чагарниковий покрив на схилах і в заплаві, знижуючи його протиерозійні властивості, унаслідок чого перший же значний паводок після посухи здатний спричинити непропорційно велике надходження змитого матеріалу до русла порівняно з паводком такої самої водності, що настав після тривалого періоду достатнього зволоження. Це явище – залежність інтенсивності ерозійної реакції водозбору від попередніх кліматичних умов, а не лише від параметрів самого паводка. Воно визначається як важливе методологічне застереження для інтерпретації окремих епізодів різкого посилення руслових деформацій, зафіксованих на картографічних чи дистанційних матеріалах[60].

Антропогенні чинники – одні з найважливіших у сучасному розвитку русел. До них належать берегоукріплення, будівництво дамб, мостових

[60] Ободовський О. Г. Руслові процеси : підручник. Київ : Київський університет, 2017. 495 с.

переходів, водозабірних споруд, спрямлення русел, видобуток руслового алювію, розорювання заплави, забудова прибережних територій, вирубування заплавної рослинності, зміна природного режиму стоку тощо. Такі впливи можуть як обмежувати природну рухливість русла, так і, навпаки, провокувати посилення ерозії на суміжних ділянках. Наприклад, берегоукріплення стабілізує певний відтинок берега, але може змінити напрямок потоку й перенести ерозійну активність нижче за течією або на протилежний берег. Видобуток гравійно-галькового матеріалу з русла знижує рівень дна, порушує баланс наносів і може спричинити антропогенне врізання русла.

Характерною особливістю антропогенного впливу на руслові процеси є його здатність поширюватися далеко за межі ділянки безпосереднього втручання – так званий каскадний, або ланцюговий, ефект. Локальне вилучення алювію з русла спричиняє дефіцит наносів нижче за течією, що потік компенсує посиленою ерозією дна й берегів на суміжних відтинках, поступово «переносячи» деформований профіль вниз за течією. Аналогічно жорстке берегоукріплення одного відтинка річища перенаправляє динамічну вісь потоку до протилежного, незахищеного берега або до ділянки безпосередньо нижче укріплення, де швидкість течії залишається підвищеною[61]. Через це оцінку антропогенного впливу на руслові процеси Пруту доцільно проводити не лише в межах окремої ділянки втручання, а в масштабі значно довшого відтинка річища, що враховує можливі низові й рідше верхові наслідки.

Для Пруту антропогенний вплив проявляється через тривале освоєння заплави, наявність населених пунктів, доріг, мостів, захисних дамб, берегоукріплювальних споруд і зміну структури землекористування. У межах Чернівецької області це особливо помітно на ділянках, де русло наближене до забудови, транспортної інфраструктури або сільськогосподарських угідь. На таких відтинках природна свобода русла часто обмежена, а заплава частково втратила здатність виконувати природні водорегулювальні й руслорегулювальні функції.

У дослідженнях природного територіального устрою ландшафту Пруту в межах Чернівецької області підкреслюється значення системи «потік – русло – заплава» та необхідність оцінки антропогенних трансформацій молодого річкового ландшафту[62]. Такий підхід дає змогу аналізувати

[61] Ободовський О. Г. Руслові процеси : підручник. Київ : Київський університет, 2017. 495 с.

[62] Ющенко Ю. С., Пасічник М. Д., Паланичко О. В., Вудвуд М. М., Закревський О. В. Природний територіальний устрій ландшафту р. Прут в межах Чернівецької області, його антропогенні трансформації та особливості функціонування системи потік – русло – заплава. *Науковий вісник Чернівецького університету. Серія: Географія*. 2023. Вип. 845. С. 41–51.

не тільки саме русло, а й прилеглу заплаву, яка є важливою частиною руслоформувальної системи.

Суттєвим наслідком антропогенного впливу є зміна просторової неоднорідності руслових процесів. У природних умовах річка має певну свободу для саморегулювання: під час паводків вона може розширювати русло, активізувати заплавні протоки, формувати нові алювіальні поверхні та частково гасити енергію потоку в межах заплави. Якщо ж заплава забудована, обвалована або відокремлена від русла дамбами, потік концентрується в обмеженому русловому коридорі. Це може збільшувати швидкість течії, підсилювати розмив дна й берегів, змінювати місця акумуляції наносів і створювати додаткові ризики для інфраструктури. Тому сучасні руслові процеси на Пруті треба розглядати як результат накладання природної морфодинаміки на історично сформовану систему господарського освоєння долини[63].

Важливо також враховувати, що різні фактори руслових процесів діють не ізольовано, а в комплексі. Наприклад, сильний паводок може не спричинити значних планових змін на ділянці зі стійкими берегами та вузькою долиною, але на відтинку з пухкими алювіальними відкладами й ослабленою прибережною рослинністю він може викликати інтенсивний розмив і зміщення русла. Так само берегоукріплення може бути відносно стабільним за умов середніх витрат води, але під час екстремального паводку змінити напрямок потоку та спричинити розмив нижче за течією. Отже, оцінка руслових процесів повинна спиратися не на один показник, а на комплексний аналіз гідрологічних, геологічних, геоморфологічних, біотичних та антропогенних умов.

Практичним наслідком цієї комплексності є те, що дві морфологічно подібні ділянки річища, розташовані навіть відносно недалеко одна від одної, можуть демонструвати суттєво різну динаміку впродовж того самого періоду спостережень, якщо вони відрізняються хоча б за одним із визначальних чинників – літологією берегів, станом прибережної рослинності чи ступенем господарського освоєння прилеглої заплави. Це унеможливлює механічне перенесення висновків, отриманих для однієї ділянки Пруту, на інші без додаткової перевірки й водночас обґрунтовує доцільність виділення в межах досліджуваного відтинка річища відносно однорідних ділянок русла та заплави як самостійних одиниць аналізу планових переформувань[64].

Для дослідження планових переформувань русла Пруту найбільш важливими є такі групи чинників: паводковий режим і руслоформувальні

[63] Ободовський О. Г. Руслові процеси : підручник. Київ : Київський університет, 2017. 495 с.

[64] Ющенко Ю. С. Геогідроморфологічні закономірності розвитку русел. Чернівці : Рута, 2005. 320 с.

витрати води; надходження та транспорт наносів; похил русла та зміна енергії потоку вздовж течії; літологічна будова берегів і заплави; ширина долини та наявність простору для бічної міграції русла; стан заплавної рослинності; наявність берегоукріплень, дамб, мостів та інших інженерних споруд; ступінь господарського освоєння прибережних територій. Саме поєднання цих факторів визначає, які процеси домінують на конкретній ділянці: бічна ерозія, акумуляція, врізання, рукавність, стабілізація русла або його антропогенне стиснення.

Практичне застосування наведеного переліку чинників передбачає їх послідовну оцінку для кожної виділеної однорідної ділянки русла й заплави Пруту: спершу визначаються гідрологічні характеристики (руслоформувальні витрати, повторюваність і тривалість паводків), далі – геолого-геоморфологічні умови (літологія берегів, ширина долини, наявність терас), після чого оцінюються стан рослинного покриву заплави та ступінь антропогенної трансформації ділянки. Лише на основі такого комплексного профілю умов можна коректно інтерпретувати виявлені за різночасовими матеріалами планові деформації русла – відрізнити деформації, зумовлені переважно природною морфодинамікою, від тих, що є прямим або опосередкованим наслідком господарської діяльності в межах конкретного відтинка долини.

Руслові процеси Пруту формуються під впливом складної взаємодії природних і антропогенних чинників. Гідрологічні фактори визначають енергію потоку та здатність річки переміщувати наноси; геологічні й геоморфологічні умови задають межі та напрямки розвитку русла; антропогенна діяльність змінює природний баланс між потоком, руслом і заплавою. Для наукового аналізу таких процесів доцільно використовувати підходи О. Г. Ободовського до гідролого-екологічної та гідроморфологічної оцінки руслових процесів, геогідроморфологічний підхід Ю. С. Ющенка, а також ландшафтно-гідроморфологічне розуміння системи «потік – русло – заплава», застосоване в дослідженнях річки Прут у межах Чернівецької області[65].

Отже, фізико-географічні умови басейну річки Прут і теоретичні засади вивчення руслових процесів утворюють нерозривну методологічну основу для подальшого аналізу планових деформацій річища. Природна диференціація басейну на гірську, передгірну та рівнинну частини безпосередньо визначає характер руслових процесів: саме поєднання геолого-геоморфологічної будови долини, кліматичного й гідрологічного

[65] Ющенко Ю. С., Пасічник М. Д., Паланичко О. В., Вудвуд М. М., Закревський О. В. Природний територіальний устрій ландшафту р. Прут в межах Чернівецької області, його антропогенні трансформації та особливості функціонування системи потік – русло – заплава. *Науковий вісник Чернівецького університету. Серія: Географія.* 2023. Вип. 845. С. 41–51.

режиму та ландшафтної структури формує ті природні передумови, у межах яких розгортаються описані вище механізми ерозії, транспорту наносів, акумуляції та планової міграції русла.

Поєднання класичного руслознавчого підходу з ландшафтно-гідроморфологічним розумінням системи «потік – русло – заплава» дає змогу розглядати Прут не як ізольований водний об'єкт, а як складну річково-долинну геосистему, чутливу як до природних, так і до антропогенних чинників. Викладені в цьому розділі положення про природні умови басейну, типи руслових деформацій і чинники їхнього розвитку є безпосередньою основою для методики дослідження, викладеної в наступному розділі, і для інтерпретації його емпіричних результатів.

2. Програмне та картографічно-інформаційне забезпечення

Для виконання гідрологічних досліджень, пов'язаних із виявленням та аналізом планових змін русел річок, використано програмний комплекс ArcGIS Desktop 10.7.1 (демоверсія з тимчасовою ліцензією). Використовувана нами збірка версії ArcGIS Desktop 10.7.1 дає змогу точно ідентифікувати програмне середовище, у якому виконувалися просторові операції. Це важливо для відтворюваності дослідження, оскільки різні версії програмного забезпечення можуть мати відмінності в роботі окремих інструментів геообробки, підтримці форматів даних або реалізації алгоритмів просторового аналізу.

Принцип відтворюваності є одним із базових методологічних вимог до досліджень, що спираються на геоінформаційний аналіз. Без чіткої фіксації версії програмного забезпечення, переліку використаних інструментів геообробки, параметрів трансформацій і системи координат результати такого дослідження практично неможливо перевірити чи повторити незалежним дослідником. Тому кожен етап опрацювання просторових даних – від геоприв'язки вихідних матеріалів до кінцевого overlay-аналізу – супроводжується фіксацією використаних інструментів, їхніх параметрів і послідовності виконання операцій. Такий підхід відповідає загальній практиці документування геопросторового аналізу, прийнятій у сучасних географічних та картографічних дослідженнях, і дає змогу в подальшому доповнити чи уточнити отримані результати за появи нових картографічних або дистанційних матеріалів без необхідності повторювати весь цикл опрацювання з нуля.

У межах дослідження планових змін русел річок основним робочим середовищем виступав модуль ArcMap. Саме в ньому здійснювалося завантаження вихідних картографічних матеріалів і космічного знімка, налаштування проєкції, візуальна інтерпретація русла, створення

shapefile-шарів, ручне оцифрування різночасових положень русла та подальше просторове накладання отриманих контурів. Для організації вхідних і похідних матеріалів використовувався ArcCatalog, через який створювалися робочі папки, shapefile-файли та структура збереження даних за окремими часовими зрізами. У дослідженні було сформовано три основні часові зрізи: положення русла за матеріалами Atlas geologiczny Galicyi кінця XIX ст., що для досліджуваної території відповідає часовому зрізу 1884 р.; положення русла за топографічними картами Генерального штабу масштабу 1 : 100 000, створеними та уточненими в 1977–1982 рр.; сучасне положення русла за космічним знімком Sentinel від 10 серпня 2025 р., завантаженим із Copernicus Browser.

Вибір саме цих трьох часових зрізів обумовлений принципом максимально можливого хронологічного охоплення за наявності якісних, придатних для геоприв'язки джерел. Проміжок між першим (1884 р.) і другим (1977–1982 рр.) зрізами становить приблизно століття, що дає змогу виявити довгострокові тенденції планового розвитку русла, зумовлені переважно природною морфодинамікою та поступовим господарським освоєнням долини в довоєнний і повоєнний періоди. Проміжок між другим і третім (2025 р.) зрізами, що охоплює чотири-п'ять десятиліть, дає змогу простежити зміни, пов'язані вже із сучасним етапом господарювання, включно з активізацією видобутку алювію, розширенням берегоукріплювальних споруд і зміною характеру землекористування в заплаві після здобуття Україною незалежності. Проміжні картографічні джерела, що потенційно могли б уточнити динаміку в межах кожного з цих великих інтервалів, не залучалися до основного аналізу через обмеження доступності якісних, придатних до геоприв'язки матеріалів для досліджуваної ділянки, однак це є одним із напрямів можливого розширення дослідження в майбутньому.

Усі просторові дані в межах проєкту були приведені до єдиної картографічної основи – проєкції UTM Zone 35N. Це забезпечило коректне суміщення історичних карт, топографічних карт і сучасного космічного знімка в одному координатному середовищі. Космічний знімок Sentinel було завантажено з Copernicus Browser уже в проєкції UTM 35N, тому він використовувався як сучасна просторова основа для ручного дешифрування русла. Відповідно до документації Copernicus Data Space Ecosystem, продукти Sentinel-2 подаються у картографічній геометрії UTM/WGS84, що дає змогу використовувати їх як базове джерело для просторового аналізу та зіставлення з іншими геоданими[66]. У цьому

[66] Copernicus Sentinel-2 Collection 1 MSI Level-1C. Sentinel Online. URL: https://sentinels.copernicus.eu/sentinel-data-access/sentinel-products/sentinel-2-data-products/collection-1-level-1c.

дослідженні автоматичне виділення водної поверхні за спектральними індексами не виконувалося; русло на знімку Sentinel дешифрувалося візуально і вручну обводилося окремим shapefile-шаром.

Свідомий вибір на користь ручного візуального дешифрування, а не автоматизованої класифікації водних об'єктів за спектральними індексами (наприклад, за нормалізованим водним індексом) обумовлений методологічною потребою забезпечення порівнянності підходу до виділення русла на всіх трьох часових зрізах. Оскільки для історичних карт і топографічних матеріалів Генерального штабу автоматизована спектральна класифікація апріорі неможлива – ці джерела є картографічними, а не багатоканальними растровими зображеннями, застосування різних методів виділення русла для різних часових зрізів (автоматичного для сучасного знімка й ручного для історичних матеріалів) могло б внести систематичну методологічну відмінність у саму процедуру визначення контуру, що ускладнило б коректне зіставлення результатів. Ручне дешифрування, застосоване одноманітно до всіх трьох джерел, хоч і поступається автоматизованим методам за швидкістю обробки великих масивів даних, забезпечує єдність методологічного підходу, що є пріоритетним для завдання порівняльного аналізу планових переформувань річища.

Для просторового прив'язування історичних і топографічних карт використовувалася панель Georeferencing в ArcMap. Згідно з документацією Esri, геоприв'язування растра полягає у визначенні його просторового положення через координати карти та узгодженні з іншими географічними даними[67]. Карти Генерального штабу масштабу 1 : 100 000 прив'язувалися за координатною сіткою, нанесеною безпосередньо на аркушах карт. Такий підхід дав змогу перенести скановані растрові зображення у спільну проєкцію проєкту та зіставити їх із сучасним космічним знімком. Після додавання контрольних точок виконувалася трансформація растра, перевірялося його положення відносно інших шарів і зберігався результат геоприв'язування.

Кількісним критерієм якості геоприв'язки в середовищі ArcGIS слугує середньоквадратична похибка (RMS error), яка обчислюється як сукупне відхилення положення контрольних точок на трансформованому растрі від їхнього фактичного положення на референтній основі. Що менше значення RMS error, то точніше растр узгоджений із картографічною основою проєкту. Оскільки абсолютного нульового значення похибки досягти практично неможливо, особливо для історичних матеріалів зі

[67] Fundamentals of georeferencing a raster dataset. ArcMap Documentation. Esri. URL: https://desktop.arcgis.com/en/arcmap/latest/manage-data/raster-and-images/fundamentals-for-georeferencing-a-raster-dataset.htm.

значним віком і можливими деформаціями паперової основи, важливим є не саме абсолютне значення похибки, а її рівномірний розподіл по площі аркуша: локалізація великих відхилень в одній частині карти є сигналом про необхідність додавання контрольних точок саме в цій зоні або перегляду вже наявних. Контроль RMS error виконувався на кожному етапі уточнення прив'язки, а остаточний результат приймався лише після того, як похибка була зведена до прийнятного для масштабу відповідного джерела рівня.

Карти з Atlas geologiczny Galicyi прив'язувалися у два етапи. Спочатку використовувалися координатні орієнтири, наявні на картографічному аркуші, що давало можливість виконати первинне позиціонування растра. Після цього просторове положення карти уточнювалося за стабільними маркерами місцевості, які могли бути надійно ідентифіковані як на історичній карті, так і на сучасній основі. До таких маркерів належали населені пункти, перехрестя доріг, мости, залізничні лінії, характерні елементи забудови та інші об'єкти, положення яких є відносно сталим у часі. Берегові лінії та саме русло річки не використовувалися як основні контрольні точки, оскільки їхнє зміщення є предметом дослідження. Такий підхід дав змогу мінімізувати ризик штучного «підтягування» історичного русла до сучасного положення.

Методологічно принциповим є саме виключення руслових об'єктів із переліку контрольних точок, оскільки використання русла для геоприв'язки перетворило б дослідження на замкнене логічне коло: якщо історичне русло примусово суміщається із сучасним положенням через контрольні точки, будь-яке подальше зіставлення цих же контурів автоматично покаже штучно занижену або й нульову величину планового зміщення незалежно від реальної картини. Тому критерієм відбору контрольних точок слугувала не лише візуальна впізнаваність об'єкта на обох джерелах, а і його незалежність від досліджуваного процесу – геоморфологічної динаміки річища. Додатковою вимогою до контрольних точок була їх рівномірність просторового розподілу вздовж досліджуваної ділянки долини, а не концентрація суто в межах населених пунктів, оскільки нерівномірний розподіл контрольних точок здатний спричинити локальне погіршення точності прив'язки саме на позаселенних відтинках річища, які нерідко становлять найбільший інтерес для аналізу природної морфодинаміки.

Після геоприв'язування картографічних матеріалів виконувалося ручне оцифрування русел. Для цього в ArcCatalog створювалися окремі shapefile-шари для кожного часового зрізу. Формат shapefile є векторним форматом Esri, призначеним для збереження геометричного положення

й атрибутивної інформації географічних об'єктів. У межах дослідження shapefile використовувався як основний формат для фіксації контурів русла за різними джерелами. Для кожного часового зрізу створювався окремий шар: русло за Atlas geologiczny Galicyi 1884 р., русло за картами Генштабу 1977–1982 рр. і русло за знімком Sentinel від 18 червня 2025 р. Це дало змогу уникнути змішування джерел різного часу та забезпечило можливість подальшого коректного накладання шарів.

Для безпосереднього оцифрування використовувався модуль Editor в ArcMap. Після запуску режиму Start Editing активувався відповідний shapefile-шар, обирався інструмент створення полігональних або лінійних об'єктів, після чого русло вручну обводилося за видимими контурами на кожному джерелі. На історичних і топографічних картах русло дешифрувалося за картографічним зображенням водного об'єкта, а на космічному знімку Sentinel – за візуально вираженою водною поверхнею та морфологічними межами руслової смуги. Для уникнення розривів, самоперетинів і неточного стикування контурів застосовувалися інструменти Snapping та стандартні засоби редагування вершин. Після завершення оцифрування для кожного шару зберігалися редагування, а в атрибутивній таблиці зазначалися рік або період джерела, тип матеріалу та коротка характеристика походження даних.

Параметри допуску прив'язки вершин (snapping tolerance) підбиралися індивідуально залежно від масштабу й деталізації конкретного джерела: для дрібномасштабніших історичних карт застосовувався більший допуск, що відповідає нижчій точності вихідного матеріалу, тоді як для сучасного супутникового знімка з високою просторовою розрізненістю використовувався менший допуск, щоб точніше фіксувати незначні вигини берегової лінії без ризику штучного «згладжування» реальної форми русла. Крім прив'язки до вершин (vertex snapping), застосовувалася також прив'язка до існуючих ребер (edge snapping) для коректного продовження ліній на межі суміжних аркушів карт, що дало змогу уникнути розривів русла саме в зонах стику картографічних листів – ділянках, де без належного контролю найчастіше виникають технічні артефакти оцифрування, які можна помилково вважати реальними плановими деформаціями.

Основна аналітична операція полягала у просторовому накладанні різночасових shapefile-шарів русла. Для цього використовувався набір інструментів Analysis Tools, насамперед група Overlay. У документації Esri зазначено, що інструменти Overlay призначені для накладання кількох класів просторових об'єктів з метою поєднання, стирання, оновлення або модифікації геометрії та атрибутів, унаслідок чого створюється новий клас просторових об'єктів. У межах цього дослідження overlay-аналіз

застосовувався для зіставлення положень русла за 1884 р., 1977–1982 рр. і 2025 р. Накладання цих шарів дало змогу виявити ділянки збігу русла, ділянки його зміщення, фрагменти старих руслових положень і сучасні ділянки, які не збігаються з історичними контурами.

Для порівняння часових зрізів використовувалися інструменти Union, Intersect, Erase та Symmetrical Difference. Інструмент Union застосовувався для об'єднання геометрії кількох різночасових шарів в один узагальнений шар, що дало можливість простежити просторову структуру багаторічного руслового поясу. Intersect використовувався для виявлення ділянок просторового збігу русла між різними часовими зрізами. Erase дав змогу виділити частини русла одного періоду, які не збігалися з іншим періодом. Symmetrical Difference застосовувався для встановлення ділянок просторової відмінності між двома положеннями русла. У підсумку було отримано основу для якісного аналізу планових змін: визначення стабільних ділянок русла, зон зміщення, фрагментів відмерлих або змінених руслових положень і нових ділянок сучасного русла.

Окрім якісного зіставлення контурів, площі ділянок розмиву та акумуляції, отримані за результатами Symmetrical Difference, придатні для кількісної оцінки: обчислення площі полігону, що відповідає зоні відступу берегової лінії за певний проміжок часу, дає змогу розрахувати середньорічну швидкість бічного зміщення русла на конкретній ділянці, якщо цю площу поділити на довжину відповідного відтинка берегової лінії та на кількість років між часовими зрізами. Такий підхід, що спирається на стандартний функціонал інструментів геообробки ArcGIS, дає змогу перейти від суто візуального опису «русло змістилося» до порівнюваного кількісного показника – метрів зміщення на рік, який можна зіставляти між різними ділянками річки або з літературними даними для інших річок Карпатського регіону. Для лінійних об'єктів русла додатково застосовувався інструмент Buffer, який дав змогу побудувати навколо контуру русла певного часового зрізу смугу заданої ширини та перевірити, які ділянки сусіднього часового контуру виходять за її межі, що є додатковим способом візуалізації зон найбільш активного планового переформування.

Таким чином, у дослідженні планових змін русел річок у середовищі ArcGIS Desktop 10.7.1 використовувалися такі основні модулі та інструменти: ArcMap – для роботи з просторовими даними, візуального дешифрування та картографування; ArcCatalog – для створення й організації shapefile-шарів; Data Frame Properties – для встановлення єдиної проєкції проєкту UTM Zone 35N; Georeferencing – для просторового прив'язування карт Atlas geologiczny Galicyi та карт Генерального штабу;

Editor – для ручного оцифрування русла за кожним часовим зрізом; Snapping – для підвищення точності стикування й редагування контурів; Analysis Tools / Overlay – для накладання різночасових положень русла; Union, Intersect, Erase і Symmetrical Difference – для виявлення просторових збігів і відмінностей між контурами русла різних періодів. Комплексне використання цих інструментів забезпечило повний цикл роботи – від підготовки та геоприв'язування вихідних матеріалів до створення різночасових shapefile-шарів русла й виконання overlay-аналізу планових змін.

Важливо підкреслити, що жоден із перелічених інструментів окремо не дає змоги отримати достовірний результат аналізу планових переформувань. Якість фінальних висновків визначається саме послідовністю й узгодженістю їх застосування – від контролю точності геоприв'язки на найраннішому етапі до топологічної перевірки готових векторних шарів на завершальному. Помилка чи недостатня увага на будь-якому проміжному етапі (наприклад, недостатня кількість контрольних точок під час геоприв'язки історичного аркуша або вибір неоптимального типу трансформації) неминуче позначається на точності всіх подальших операцій, включно з підсумковим overlay-аналізом. Тому опис програмного та картографічно-інформаційного забезпечення в цьому розділі слід розглядати не як перелік окремих незалежних інструментів, а як цілісний методологічний ланцюг, кожна ланка якого впливає на достовірність кінцевого результату дослідження планових деформацій русла Пруту.

У дослідженні використано три аркуші історико-картографічні карти з видання Atlas geologiczny Galicyi: Kuty, Śniatyn і Kołomyja. Atlas geologiczny Galicyi є одним із перших системних серійних видань геологічних карт для території Галичини. За бібліографічними описами, атлас видавався у Кракові впродовж 1887–1911 рр. під егідою Комісії фізіографічної Академії умінь у Кракові й складався з 25 частин, кожна з яких супроводжувалася пояснювальним текстом[68]. За даними M. Graniczny, J. Kacprzak, H. Urban і S. Wołkowicz, загалом було опубліковано 99 аркушів карт масштабу 1 : 75 000, а для виконання геологічної зйомки в багатьох випадках застосовувалося детальніше польове картування, переважно в масштабі 1 : 25 000[69]. Це свідчить, що аркуші атласу мають не лише картографічну, а й польову геологічну основу.

[68] Atlas geologiczny Galicji w Archiwum WIG. Geoforum.pl. 19.05.2015. URL: https://geoforum.pl/news/19839/atlas-geologiczny-galicji-w-archiwum-wig.

[69] Graniczny M., Kacprzak J., Urban H., Wołkowicz S. Atlas Geologiczny Galicyi – pierwsza seryjna edycja map geologicznych ziem polskich. *Przegląd Geologiczny*. 2007. Vol. 55, nr 5. S. 368–372. URL: https://www.pgi.gov.pl/images/stories/przeglad/pg_2007_05_13.pdf.

Аркуш Kuty – «Кути» має номенклатурне позначення Pas 11, Słup XIII і входить до 2-го зошита атласу. За каталогом Національної бібліотеки Польщі, 2-й зошит містив шість карт: Nadwórna, Mikuliczyn, Żabie, Kuty, Krzyworównia, Popadia-Hryniawa; місце і рік видання – Kraków, 1888[70]. Пояснювальний текст до цього зошита підготував Рудольф Зубер; у цифровому описі Pedagogiczna Biblioteka Cyfrowa вказано назву праці Atlas geologiczny Galicyi. Tekst do zeszytu drugiego (Nadwórna, Mikuliczyn, Żabie, Kuty, Krzyworównia, Popadia-Hryniawa), автора Rudolf Zuber і дату 1888 р. На самому аркуші Kuty зазначено: Badania geologiczne przeprowadził Dr Zuber, тобто геологічні дослідження виконав доктор Зубер. Також на нижньому полі аркуша вказано: Wyk. w c. k. Zakładzie wojsk geograficznym w Wiedniu, що означає виконання карти в цісарсько-королівському військово-географічному закладі у Відні. У центрі нижнього поля подано масштаб Stosunek 1 : 75 000, а видавцем зазначено Wyd. nakładem Wydziału Krajowego Królestwa Galicyi i Lodomeryi.



Рис. 1. Аркуш Kuty Pas 11, Słup XIII використаний для дослідження басейну р. Прут

[70] Zuber R. Atlas geologiczny Galicyi. Tekst do zeszytu drugiego: Nadwórna, Mikuliczyn, Żabie, Kuty, Krzyworównia, Popadia-Hryniawa. Kraków : Drukarnia Uniwersytetu Jagiellońskiego, 1888. Pedagogiczna Biblioteka Cyfrowa. URL: https://pbc.uken.krakow.pl/dlibra/publication/1160/edition/1137.

На самому аркуші Kuty окремої друкованої дати польової зйомки або дати уточнення даних не зазначено. Тому в роботі доцільно вказувати, що геологічні дослідження були виконані Р. Зубером до публікації 2-го зошита, тобто не пізніше 1888 р., але точний рік польового знімання за самим аркушем не встановлюється. За змістом цей аркуш є особливо важливим для дослідження планових деформацій річки Черемош, оскільки охоплює район Кутів, передгірно-гірську частину Покутсько-Буковинських Карпат, долинні комплекси Черемошу та прилеглих водотоків. У легенді виділено алювіальні відклади, річковий і місцевий дилювій, міоценові, олігоценові, еоценові та крейдові утворення, а також тектонічні лінії і напрями падіння пластів. Для бакалаврського дослідження цей аркуш може використовуватися для уточнення історичних меж алювіальної рівнини, аналізу геологічної основи долини, співвідношення русла, заплави, терас і схилових комплексів.



Рис. 2. Аркуш Śniatyn Pas 11, Słup XIV і входить до 18-го зошита атласу Національної бібліотеки Польщі використаний для дослідження

Аркуш Śniatyn – «Снятин» має позначення Pas 11, Słup XIV і входить до 18-го зошита атласу. За каталогом Національної бібліотеки Польщі, зошит 18 містив три карти: Stanisławów, Kołomyja і Śniatyń; місце та рік видання вказані як Kraków, 1901[71]. У Polona цей зошит також подано як Atlas geologiczny Galicyi. Z. 18, Kart trzy[72]. Пояснювальний текст до 18-го зошита підготував проф. Ярослав Л. М. Ломницький; він був виданий у Кракові в 1905 р. під назвою Atlas geologiczny Galicyi: tekst do zeszytu osiemnastego[73]. На самому аркуші Śniatyn[74] зазначено, що геологічні дослідження виконав Prof. J. Łomnicki. На нижньому полі також вказано виконання у c. i k. Zakładzie wojskowym geograficznym w Wiedniu, масштаб 1 : 75 000 і видавця – Akademia Umiejętności w Krakowie.

Окремого друкованого періоду польової зйомки чи дати оновлення на аркуші Śniatyn не подано. На правому нижньому полі наявні пізніші рукописні або інвентарні позначки, зокрема «1953» і «M-953», однак вони не є датою створення карти або польової зйомки. У тексті до 18-го зошита Ломницький подає уточнення та критичну оцінку раніше виконаних геологічних матеріалів, зокрема щодо території Покуття й аркуша Śniatyn. Він розглядає долину Пруту, тераси, алювіальні відклади, карпатські гравії, лесові глини та покутські намули. Тому цей аркуш доцільно використовувати як джерело для ширшої геолого-геоморфологічної характеристики Покуття, долини Пруту та регіонального контексту формування алювіальних рівнин, пов'язаних із річковими системами Черемошу і Пруту.

Аркуш Kołomyja – «Коломия» має позначення Pas 10, Słup XIII і також належить до 18-го зошита. У бібліографічному описі зошита 18 він поданий разом з аркушами Stanisławów і Śniatyn; рік видання зошита в каталозі Національної бібліотеки Польщі – 1901[75]. Цифрова бібліотека Університету Вроцлава подає цей аркуш як Atlas geologiczny Galicyi 1 : 75 000 – Pas 10 Słup XIII Kołomyja, а творцем зазначає Jarosław

[71] Mapy i atlasy : katalog zbiorów kartograficznych Biblioteki Narodowej. Warszawa : Biblioteka Narodowa. URL: https://www.bn.org.pl/download/document/1533557307.pdf.

[72] Graniczny M., Kacprzak J., Urban H., Wołkowicz S. Atlas Geologiczny Galicyi – pierwsza seryjna edycja map geologicznych ziem polskich. *Przegląd Geologiczny*. 2007. Vol. 55, nr 5. S. 368–372. URL: https://www.pgi.gov.pl/images/stories/przeglad/pg_2007_05_13.pdf.

[73] Łomnicki J. L. M. Atlas geologiczny Galicyi: tekst do zeszytu osiemnastego: Stanisławów, Kołomyja, Śniatyn. Kraków : Nakładem Akademii Umiejętności, 1905. 145 s. Google Books. URL: https://books.google.com/books/about/Atlas_geologiczny_Galicyi.html?id=RTx60AEACAAJ.

[74] Łomnicki J. Atlas geologiczny Galicyi 1:75 000 – Pas 11 Słup XIV Śniatyn. Biblioteka Cyfrowa Uniwersytetu Wrocławskiego. URL: https://bibliotekacyfrowa.pl/publication/114720.

[75] Mapy i atlasy : katalog zbiorów kartograficznych Biblioteki Narodowej. Warszawa : Biblioteka Narodowa. URL: https://www.bn.org.pl/download/document/1533557307.pdf.

Łomnicki[76]. На самому аркуші Кołомyja вказано: Badania geologiczne przeprowadził Prof. J. Łomnicki, тобто геологічні дослідження виконав професор Я. Ломницький. У нижньому полі також зазначено, що карту виконано у c. і k. Zakładzie wojskowym geograficznym w Wiedniu, масштаб становить 1 : 75 000, а видання здійснено накладом Академії умінь у Кракові.

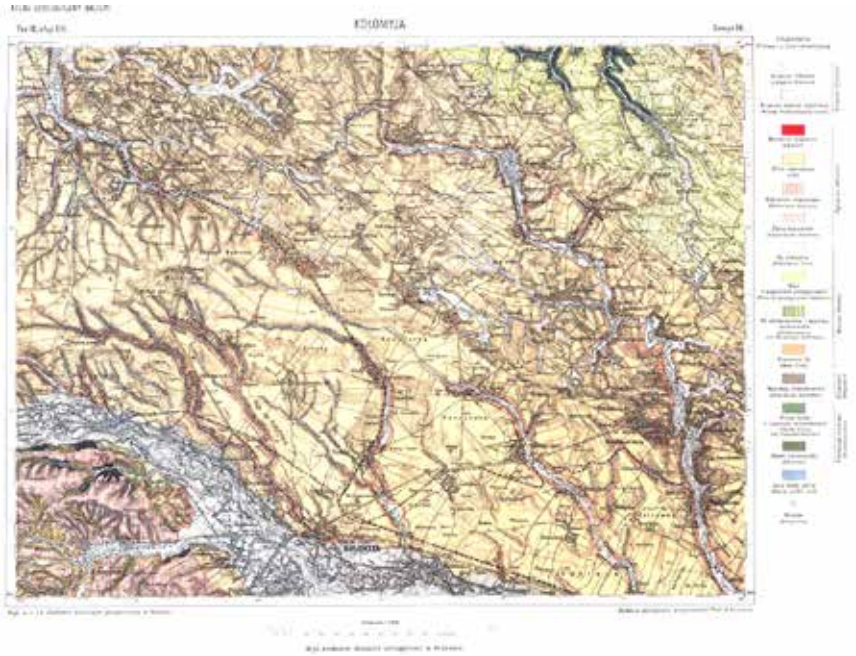


Рис. 3. Аркуш Кołомyja Pas 10, Słup XIII використаний для дослідження планових деформацій р. Прут

На аркуші Кołомyja немає друкованої дати польового знімання або окремого зазначення про уточнення даних. У правій верхній частині аркуша видно штамп «14 MARZ 1933», але його слід трактувати як пізнішу бібліотечну, архівну або інвентарну позначку, а не як дату створення чи публікації карти. Зміст аркуша важливий для аналізу передгірної ділянки долини Пруту та суміжних територій Покуття. У легенді відображено

[76] Łomnicki J. Atlas geologiczny Galicyi 1 : 75 000 – Pas 10, Słup XIII, Kołomyja [карта]. Digital Library of University of Wroclaw. URL: https://bibliotekacyfrowa.pl/en/dlibra/metadatasearch?action=AdvancedSearchAction&type=-3&val1=Title%3A%22Atlas+Geologiczny+Galicyi%22.

молодший і старший алювій, карпатські гравії, лесові відклади, покутські глини, добротівські шари, крейдові та юрські утворення, а також соляні прояви. Для дослідження планових деформацій русла Черемошу цей аркуш має порівняльне значення, оскільки дає змогу простежити особливості будови суміжних долинних систем передгірного типу, виявити поширення алювіальних і терасових поверхонь та оцінити зв'язок між літологічною будовою і потенційною русловою рухливістю.

Отже, три використані аркуші – Kuty, Śniatyn і Kołomyja – є цінними джерелами для історико-геоморфологічного аналізу. Вони створені на основі австрійської топографічної карти масштабу 1 : 75 000; у повідомленні Geoforum про цифрове архівування аркушів зазначено, що публікація ґрунтувалася на австрійській карті цього масштабу, а серед оцифрованих матеріалів трапляються аркуші з авторськими поправками[77]. На трьох розглянутих аркушах безпосередньо зазначені виконавці геологічних досліджень, масштаб, місце картографічного виконання та видавці, однак не вказані точні роки польового знімання. Тому в разі використання цих карт слід розрізняти: по-перше, дату публікації зошита; по-друге, автора геологічних досліджень; по-третє, наявність або відсутність спеціальних позначок про уточнення даних. Для аркуша Kuty датою публікації є 1888 р., для аркушів Śniatyn і Kołomyja – 1901 р. за бібліографічним описом карт, тоді як пояснювальний текст до 18-го зошита вийшов у 1905 р. Саме ці джерела доцільно використовувати для реконструкції історичної геологічної основи долин, визначення меж алювіальних рівнин, аналізу заплавно-терасових комплексів і пояснення природних передумов планових деформацій русла річки Черемош.

Порівняно з топографічними картами аркуші геологічного атласу мають істотно вищу деталізацію польової геологічної основи (масштаб 1 : 75 000 проти 1 : 100 000 у карт Генерального штабу), однак поступаються їм у точності відображення власне гідрографічної мережі, оскільки основним призначенням атласу була фіксація геологічної будови території, а не картографування водних об'єктів як таких. Це визначає комплементарний, а не взаємозамінний характер використання цих двох типів джерел у цьому дослідженні: геологічний атлас передусім слугує для реконструкції найдавнішого доступного часового зрізу планового положення русла та для розуміння літологічної основи долини, тоді як топографічні карти Генерального штабу і супутниковий знімок Sentinel-2 забезпечують точнішу й послідовну фіксацію власне контуру русла для

[77] Atlas geologiczny Galicji w Archiwum WIG. Geoforum.pl. 19.05.2015. URL: https://geoforum.pl/news/19839/atlas-geologiczny-galicji-w-archiwum-wig.

двох пізніших часових зрізів. Саме поєднання цих різнотипних, але взаємодоповнювальних джерел дало змогу сформувати тривалий, майже півторастолітній ряд спостережень за плановим положенням русла в межах досліджуваної ділянки басейну Пруту.

Для картографічного забезпечення дослідження використано комплект із двох суміжних аркушів радянської топографічної карти Генерального штабу масштабу 1 : 100 000: M-35-123 «Коломыя» та M-35-124 «Снятын». Обидва аркуші входять до колекції Russian Military Topographic Maps, оцифрованої та оприлюдненої Indiana University Libraries. Каталожний запис IU DataCORE для аркуша M-35-123 подає його як набір даних із територіальним охопленням району Kolomyia, Ivano-Frankivsk oblast, Ukraine, координатами 48.333, 25, 48.667, 25.5 та відкритою ліцензійною позначкою No Copyright – United States[78]. Для аркуша M-35-124 «Снятын» запис IU Digital Collections подає ідентифікатор VAC9619-003247, координати 48.333, 25.5, 48.667, 26 та пряме посилання на DataCORE Dataset Download[79]. Додатково сторінка BTAA Geoportal для M-35-124 підтверджує публічний доступ до матеріалу і формат GeoTIFF[80].

Комплект карт охоплює територію між 25°00′ і 26°00′ сх. д. та 48°20′ і 48°40′ пн. ш., тобто простір Покуття, Передкарпаття та прилеглих буковинських територій. Аркуш M-35-123 відображає західну частину досліджуваної території, зокрема район Коломиї, долину р. Прут, передгірні ділянки в напрямку Косова, Пістиня, Заболотова та суміжні терасово-рівнинні простори. Аркуш M-35-124 є східним продовженням цього картографічного покриття і включає райони Снятина, Заболотова, Заставни, північні околиці Чернівців, а також фрагменти долин Пруту, Черемошу та Дністра. Просторова суміжність цих аркушів дає змогу використовувати їх як єдину картографічну основу для аналізу річкових долин і прилеглих ландшафтів у межах західної частини України.

За службовими написами на полях самих аркушів обидві карти видані в 1978 р. Аркуш M-35-123 «Коломыя» складений за матеріалами зйомки 1948–1949 рр. і оновлений у 1977 р.; аркуш M-35-124 «Снятын» складений за матеріалами зйомки 1948 р. і також оновлений у 1977 р. Отже, ці карти мають подвійну часову інформативність: первинна топографічна основа пов’язана з післявоєнною зйомкою кінця 1940-х років, тоді як оновлення

[78] M-35-123 Коломыя : Data Set. Indiana University DataCORE. URL:https://datacore.iu.edu/concern/data_sets/rb68xc70s.

[79] M-35-124 Снятын : Digital Collections record. Indiana University Digital Collections. URL: https://digital-collections.apps.iu.edu/.

[80] M-35-124 Снятын (Sniatyn, Ukraine). BTAA Geoportal. URL: https://geo.btaa.org/catalog/VAC9619-003247.

1977 р. відображає стан місцевості другої половини 1970-х років. У дослідженнях планових змін русел ці аркуші доцільно трактувати як історичну топографічну основу станом на 1977–1978 рр., але з обов'язковим уточненням, що частина базової інформації походить із матеріалів зйомки 1948–1949 рр.

Математична основа карт відповідає системі координат 1942 р., що зазначено у верхній частині рамок аркушів. Для роботи з такими матеріалами в сучасному ГІС-середовищі найбільш відповідним формалізованим варіантом є Pulkovo 1942 / Gauss-Kruger zone 5, оскільки EPSG:28405 описує цю систему як проєкцію для топографічного картографування середнього масштабу, що охоплює, зокрема, територію України в межах 24°–30° сх. д., має метричні одиниці, еліпсоїд Krassowsky 1940 та центральний меридіан 27° сх. д.[81]. Тому під час геоприв'язки або перевірки просторового положення сканованих аркушів у QGIS чи ArcGIS доцільно задавати систему СК-42 / Гаусса–Крюґера, зона 5, а після цього за потреби трансформувати дані до WGS 84, УСК-2000 або іншої системи координат, у якій виконуються подальші просторові операції.

Явне зазначення коду EPSG для кожної використаної системи координат є важливою методологічною практикою, оскільки словесні назви систем координат (наприклад, «система 1942 року» чи «Пулково-42») можуть по-різному реалізовуватися в різному програмному забезпеченні залежно від конкретних параметрів зонування й трансформаційних ключів, тоді як однозначний числовий ідентифікатор EPSG усуває цю двозначність і дає змогу будь-якому іншому дослідникові точно відтворити просторову основу, використану в цій роботі. Аналогічний принцип застосовувався і до решти систем координат проєкту: історичного датуму Hermannskogel / MGI для аркушів геологічного атласу та WGS 84 / UTM zone 35N (EPSG:32635) для сучасного супутникового знімка і фінальної робочої основи проєкту, що в сукупності забезпечило прозору й перевірювану математичну базу всього циклу геопросторового опрацювання.

За змістом цей комплект є топографічною картографічною моделлю місцевості. У ньому поєднано планову координатну основу, висотну модель рельєфу, гідрографічну мережу, населені пункти, шляхи сполучення, рослинний покрив, заболочені ділянки, меліоративні елементи, адміністративні межі та окремі господарські об'єкти. Рельєф передано горизонталями, висотними відмітками та додатковими умовними позначеннями; за написами на полях карт, суцільні горизонталі проведені

[81] EPSG Geodetic Parameter Dataset. Pulkovo 1942 / Gauss-Kruger zone 5. EPSG:28405. URL: https://epsg.io/28405

через 20 м, а висоти подано в Балтійській системі висот. Це дає змогу аналізувати загальні риси морфології поверхні: вододільні ділянки, долинні пониження, схили, терасові уступи, передгірні поверхні та просторовий перехід від рівнинних до передгірних ландшафтів.

Гідрографічна складова комплекту має особливе значення для гідрологічного та руслознавчого аналізу. На аркушах відображено русла Пруту, Черемошу, Дністра та їхніх приток, а також заплавні ділянки, протоки, острови, заболочені місцевості, меліоративні канали, мости, дороги вздовж долин і прибережні населені пункти. Масштаб 1 : 100 000 означає, що 1 см на карті відповідає 1 км на місцевості, тому ці аркуші придатні для аналізу загального положення русел, конфігурації долин, просторового співвідношення річкової мережі з рельєфом і системою розселення. Водночас для детального вивчення малих руслових форм необхідно враховувати картографічну генералізацію: дрібні протоки, локальні берегові уступи, короткочасні алювіальні форми або зміщення берегової лінії на десятки метрів могли бути спрощені або не відображені.

Ще одним наслідком масштабу 1 : 100 000 є умовність зображення ширини самого русла на карті: згідно із загальними картографічними принципами, водні об’єкти, ширина яких на місцевості менша за певну порогову величину (для цього масштабу – близько кількох десятків метрів), передаються не в масштабі, а позамасштабним умовним знаком лінії постійної товщини, тоді як ширші річки показуються двома лініями берегів у приблизному масштабі. Це означає, що безпосередньо вимірювати фактичну ширину русла Пруту за топографічною картою масштабу 1 : 100 000 на всіх ділянках однаково коректно не можна: там, де застосовано позамасштабний знак, товщина лінії на карті відображає умовність зображення, а не реальну ширину потоку. У цьому дослідженні вказана обставина враховувалася під час інтерпретації результатів оцифрування: кількісні висновки про зміну ширини русла спиралися передусім на ті ділянки, де річка відображена в масштабі двома лініями берегів, тоді як на вужчих відтинках аналізувалося переважно планове положення осьової лінії русла, а не абсолютна ширина водного плеса.

З позицій картографічної моделі ці аркуші слід розглядати не як просте зменшене зображення території, а як узагальнену просторово-знакову модель, у якій реальні об’єкти відібрано, класифіковано та подано за допомогою системи умовних позначень. У сучасній картографії карта трактується як інструмент представлення, візуалізації та аналізу геопросторової інформації, що дає змогу не лише фіксувати об’єкти,

а й інтерпретувати просторові зв'язки між ними[82]. Саме тому комплект М-35-123 і М-35-124 може бути використаний як історична топографічна основа для зіставлення з сучасними ортофотопланами, супутниковими знімками Landsat і Sentinel, цифровими моделями рельєфу та сучасними векторними шарами.

Теоретичною основою для оцінки придатності топографічних карт масштабу 1 : 100 000 до аналізу дрібних руслових форм є поняття картографічної генералізації – закономірного відбору й узагальнення змісту карти відповідно до її масштабу та призначення. Генералізація передбачає кілька взаємопов'язаних процедур: відбір об'єктів (не всі елементи місцевості потрапляють на карту дрібнішого масштабу), спрощення обрисів (дрібні вигини контуру, зокрема берегової лінії, згладжуються), об'єднання близько розташованих об'єктів в один умовний знак і зміщення об'єктів для уникнення накладання позначень у зонах їх скупчення. Для русла річки це означає, що на картах масштабу 1 : 100 000 достатньо надійно відображається плановий рисунок головного русла та великі острови чи рукави, тоді як дрібні прируслові форми, невеликі протоки або короткочасні побочні шириною в кілька метрів можуть бути або спрощені до єдиної лінії, або взагалі не показані. Це необхідно враховувати під час інтерпретації результатів overlay-аналізу: зафіксована на картах Генерального штабу відсутність певної дрібної форми не обов'язково означає її фактичну відсутність на місцевості в момент зйомки, а може бути наслідком картографічної генералізації.

Таким чином, комплект аркушів М-35-123 «Коломыя» та М-35-124 «Снятын» є цінним джерелом просторової інформації для історико-географічного, гідрологічного, геоморфологічного та ландшафтного аналізу. Його переваги – єдина математична основа, суміжне просторове покриття, наявність висотної інформації, достатньо деталізоване відображення гідрографії, розселення, транспортної мережі та земного покриву. Основними обмеженнями є масштаб 1 : 100 000, генералізація змісту та часовий розрив між первинною зйомкою 1948–1949 рр. і оновленням 1977 р. Тому в разі використання цих карт для аналізу планових переформувань русел Пруту, Черемошу або Дністра необхідно обов'язково зазначати масштаб, систему координат, рік видання, рік оновлення, період первинної зйомки та електронну базу даних, з якої отримано цифрові копії карт.

Додатковим методологічним застереженням є те, що позначення «оновлено у 1977 р.» на топографічних картах радянського виробництва

[82] MacEachren A. M. How Maps Work: Representation, Visualization, and Design. New York : Guilford Press, 1995. 513 p.

зазвичай означає вибіркове коригування окремих елементів змісту карти (насамперед транспортної мережі, меж землекористування та нових об'єктів забудови) відносно матеріалів первинної зйомки, а не повторну суцільну зйомку всієї території аркуша. Це означає, що гідрографічна мережа на карті могла зберігати конфігурацію, зафіксовану ще під час зйомки 1948–1949 рр., якщо впродовж наступних десятиліть вона не зазнала настільки помітних змін, щоб це було відображено картографами під час оновлення. Для дослідження планових переформувань русла ця обставина є важливою: датування відповідного часового зрізу як «1977–1982 рр.» слід розглядати як умовну верхню межу, тоді як фактичний стан річища на карті може відповідати дещо більш ранньому періоду в межах зазначеного інтервалу.

Опрацювання картографічного матеріалу виконувалося поетапно з метою приведення різночасових і різнотипних джерел до єдиної просторової основи, придатної для подальшого порівняльного аналізу положення русел річок. У дослідженні використано аркуші з «Геологічного атласу Галичини», топографічні карти Генерального штабу та сучасний супутниковий знімок Sentinel-2, завантажений із Copernicus Browser. Основним завданням попереднього опрацювання було забезпечення просторової сумісності цих матеріалів, після чого за кожним джерелом окремо створювалися векторні шари русел.

Загальна послідовність опрацювання відповідає стандартній технологічній схемі підготовки різночасових картографічних матеріалів для порівняльного геоморфологічного аналізу: сканування або отримання цифрової копії вихідного джерела; оцінка його геодезичної основи та визначення необхідного способу геоприв'язки; власне геоприв'язка з контролем залишкової похибки; приведення до єдиної робочої системи координат проєкту; візуальне дешифрування об'єкта дослідження та його векторизація; формування атрибутивної інформації; топологічний контроль якості отриманого векторного шару. Дотримання цієї послідовності для всіх трьох різнотипних джерел – історичного геологічного атласу, топографічних карт середини–другої половини XX ст. і сучасного супутникового знімка – є ключовою умовою коректності подальшого порівняльного аналізу, оскільки будь-яке порушення послідовності опрацювання (наприклад, векторизація до завершення контролю точності геоприв'язки) здатне внести систематичну похибку, яку складно виявити на пізніших етапах роботи.

Першим етапом виконувалася географічна прив'язка аркушів «Геологічного атласу Галичини» в ГІС середовищі Arc GIS 10.7. Оскільки ці карти були створені на основі австрійської топографічної карти Spezialkarte

масштабу 1 : 75 000, для них характерне використання історичної геодезичної основи, пов'язаної з еліпсоїдом Бесселя 1841 року, датумом Hermannskogel / MGI та відліком довгот від початкового меридіана Ферро. Питання мозаїчного зведення аркушів такої історичної австрійської знімальної основи докладно розглянуте в спеціальній картографічній літературі[83], зокрема в контексті ширшого проєкту цифровізації карт габсбурзьких військових зйомок[84]. Тому на першому етапі прив'язка виконувалася не за довільними об'єктами, а за координатами рамки аркуша, підписаними на самій карті. Для кожного аркуша окремо зчитувалися координати кутів рамки: верхнього лівого, верхнього правого, нижнього правого та нижнього лівого. Широта використовувалася без перерахунку, а довгота, підписана від меридіана Ферро, перераховувалася в довготу від Гринвіча.

Розрахунок виконувався за формулою:

λ Greenwich = λ Ferro – 17°39′46,02″.

Далі було перераховано координати кожного з листів на грінвічські координати:

Аркуш «КОЛОМИЯ» (Pas 10, Słup XIII)
Північно-західний кут: DMS: 48° 45' 00" N, 24° 50' 14" E
Північно-східний кут: DMS: 48° 45' 00" N, 25° 20' 14" E
Південно-західний кут: DMS: 48° 30' 00" N, 24° 50' 14" E
Південно-східний кут: DMS: 48° 30' 00" N, 25° 20' 14" E
Аркуш «КУТИ» (Pas 11, Słup XIII)
Північно-західний кут: DMS: 48° 30' 00" N, 24° 50' 14" E
Північно-східний кут: DMS: 48° 30' 00" N, 25° 20' 14" E
Південно-західний кут: DMS: 48° 15' 00" N, 24° 50' 14" E
Південно-східний кут: DMS: 48° 15' 00" N, 25° 20' 14" E
Аркуш «СНЯТИН» (Pas 11, Słup XIV)
Північно-західний кут: DMS: 48° 30' 00" N, 25° 20' 14" E
Північно-східний кут: DMS: 48° 30' 00" N, 25° 50' 14" E
Південно-західний кут: DMS: 48° 15' 00" N, 25° 20' 14" E
Південно-східний кут: DMS: 48° 15' 00" N, 25° 50' 14" E

Однак лише координатної прив'язки для таких історичних матеріалів недостатньо. Це пов'язано з кількома чинниками: деформацією паперової основи під час зберігання, можливими похибками сканування, локальними

[83] Molnár G., Timár G. Mosaicking of the 1 : 75 000 sheets of the Third Military Survey of the Habsburg Empire. *Acta Geodaetica et Geophysica Hungarica*. 2009. Vol. 44, No. 1. P. 115–120. URL: https://real.mtak.hu/82177/.

[84] Timár G., Biszak S., Székely B., Molnár G. Digitized Maps of the Habsburg Military Surveys – Overview of the Project of ARCANUM Ltd. (Hungary). Preservation in Digital Cartography. Berlin ; Heidelberg : Springer, 2010. P. 273–283.

особливостями історичної проєкції та невідповідністю між давньою геодезичною основою і сучасними системами координат. Тому після первинної прив'язки за координатами виконувалася додаткова доприв'язка за стабільними орієнтирами на місцевості. Такий підхід відповідає загальним принципам геоприв'язки растрових матеріалів, згідно з якими точність результату залежить від якості та рівномірності розміщення контрольних точок[85].

Джерелом додаткових розбіжностей між історичною і сучасною картографічною основою є також відмінності самих геодезичних систем відліку. Карти «Геологічного атласу Галичини» побудовані на еліпсоїді Бесселя 1841 р. і датумі Hermannskogel, тоді як топографічні карти Генерального штабу масштабу 1 : 100 000 використовують систему координат 1942 р. з еліпсоїдом Krassowsky 1940, а сучасний супутниковий знімок Sentinel-2 – загальноземний еліпсоїд WGS 84. Кожна із цих геодезичних основ характеризується власними параметрами еліпсоїда (великою піввіссю та стисненням) і власним положенням центра відносно фізичного центра мас Землі, тому пряме накладання об'єктів, координати яких визначені в різних системах, без відповідного перетворення призводить до систематичного просторового зсуву, що для територій такого масштабу може сягати десятків і навіть сотень метрів. Саме тому в цьому дослідженні кожен історичний і сучасний матеріал послідовно приводився до єдиної робочої системи координат проєкту через комбінацію математичного перерахунку (для довгот від меридіана Ферро) і геоприв'язки за контрольними точками (для компенсації решти систематичних і випадкових розбіжностей), а не через пряме накладання різнорідних матеріалів.

Для доприв'язки використовувалися об'єкти, положення яких із високою імовірністю залишалося стабільним упродовж тривалого часу. До таких орієнтирів належали старі церкви, костели, монастирі, історичні громадські споруди, залізничні станції, перехрестя давніх доріг у центральних частинах населених пунктів, окремі мости та інші інфраструктурні об'єкти, які можна було впевнено ідентифікувати як на історичній карті, так і на сучасній топографічній або супутниковій основі. Русла річок як опорні точки не використовувалися, оскільки саме їхнє планове положення є предметом аналізу. Використання русел як контрольних точок могло б штучно зменшити реальні відмінності між історичним і сучасним положенням водотоків.

[85] Fundamentals of georeferencing a raster dataset. ArcMap Documentation. Esri. URL: https://desktop.arcgis.com/en/arcmap/latest/manage-data/raster-and-images/fundamentals-for-georeferencing-a-raster-dataset.htm.

У середовищі ArcGIS для кожного аркуша створювалася таблиця контрольних точок. Спочатку задавалися точки кутів рамки карти, перераховані з довгот від Ферро до довгот від Гринвіча, а потім додавалися точки уточнення за орієнтирами на місцевості. Контрольні точки розміщувалися рівномірно по площі аркуша, щоб уникнути ситуації, коли одна частина карти прив'язана добре, а інша має значні просторові відхилення. Особлива увага приділялася периферійним частинам аркуша, оскільки саме там деформації історичних сканів часто проявляються найбільш помітно.

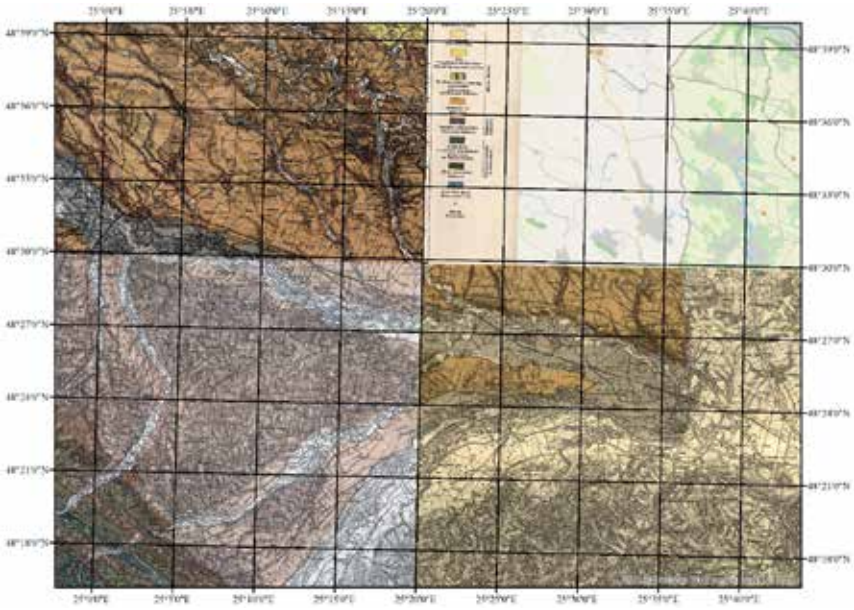


Рис. 4. Результат геоприв'язки аркуша з «Геологічного атласу Галичини» масштабу 1 : 75 000 із нанесеною координатною сіткою

Після нанесення контрольних точок оцінювалися залишкові похибки. Точки з надмірними відхиленнями переглядалися, уточнювалися або вилучалися, якщо їх відповідність сучасному об'єкту була сумнівною. Для відносно рівних і якісно відсканованих аркушів використовувалася афінна або проєктивна трансформація. Якщо ж аркуш мав помітні локальні деформації, застосовувалася трансформація типу Spline або Adjust. Згідно з документацією Esri, Spline-трансформація забезпечує високу локальну відповідність у контрольних точках, однак її використання потребує

достатньої кількості якісних контрольних точок і не завжди гарантує однакову точність на ділянках між ними[86]. Тому вибір типу трансформації здійснювався з урахуванням якості скану, кількості контрольних точок і просторового розподілу залишкових похибок. Остаточний результат зберігався як геоприв'язаний растровий файл, придатний для подальшого дешифрування руслової мережі.

Принципова відмінність між афінною (проєктивною) і сплайновою трансформаціями полягає в характері математичної моделі, яка описує перехід від вихідних координат растра до координат картографічної проєкції: афінна трансформація є глобальною лінійною моделлю, що застосовує до всього растра єдиний набір коефіцієнтів масштабування, повороту й зсуву, тоді як сплайнова трансформація є локальною, гумоподібною («rubber-sheeting») моделлю, яка може по-різному деформувати різні ділянки растра відповідно до розташування найближчих контрольних точок. Для добре збережених, відносно недеформованих сканів історичних карт афінна трансформація зазвичай є достатньою і має перевагу в передбачуваності результату на ділянках поза контрольними точками. Натомість для аркушів із помітними локальними деформаціями паперової основи – типовими для матеріалів кінця XIX – початку XX ст., що зберігалися впродовж понад століття, саме локальна сплайнова трансформація дає змогу компенсувати нерівномірне «викривлення» різних частин аркуша, хоча й потребує ретельнішого контролю точності на ділянках, віддалених від найближчих контрольних точок.

Наступним етапом опрацьовувалися топографічні карти Генерального штабу. На відміну від аркушів «Геологічного атласу Галичини», ці карти мають чітко виражену координатну рамку та кілометрову сітку, тому їх прив'язка виконувалася переважно за координатами. Для кожного аркуша визначалися координати кутів рамки або перетинів кілометрової сітки, після чого ці точки вводилися як контрольні у модулі Georeferencing. Такий спосіб дав змогу виконати просторове узгодження карт Генерального штабу без додаткової інтерпретації нестабільних природних об'єктів. Після виконання геоприв'язки ці карти трансформувалися до єдиної робочої системи координат проєкту, що забезпечило їх сумісність із геоприв'язаними історичними аркушами та сучасним супутниковим зображенням.

Прив'язка аркушів M-35-123 «Коломыя» та M-35-124 «Снятын» виконувалася з урахуванням їхньої математичної основи та регулярної картографічної сітки. Оскільки ці карти Генерального штабу масштабу

[86] Overview of georeferencing. ArcGIS Pro Documentation. Esri. URL: https://doc.esri.com/en/arcgis-pro/latest/help/data/imagery/overview-of-georeferencing.html.

1 : 100 000 створені в системі координат 1942 р., для їх просторового задання в ГІС-середовищі використовувалася система Pulkovo 1942 / Gauss-Kruger zone 5, що відповідає території дослідження в межах 24°–30° сх. д.[87]. Контрольними точками для геоприв'язки були кути рамки аркушів та перетини кілометрової сітки, координати яких зчитувалися безпосередньо з картографічного зображення.



Рис. 5. Геоприв'язані аркуші топографічних карт Генерального штабу (M-35-123 та M-35-124) масштабу 1 : 100 000 із нанесеною координатною сіткою

Після введення контрольних точок виконувалася трансформація растрових зображень у робочу систему координат проєкту. Для перевірки правильності прив'язки зіставлялося положення рамок суміжних аркушів, гідрографічної мережі, населених пунктів, доріг і залізниць. Особлива увага приділялася зоні стику аркушів по меридіану 25°30′ сх. д., оскільки саме тут перевірялася просторова узгодженість карт M-35-123 і M-35-124. Після контролю похибок обидва аркуші використовувалися як єдина топографічна основа для подальшого оцифрування русел річок.

[87] EPSG Geodetic Parameter Dataset. Pulkovo 1942 / Gauss-Kruger zone 5. EPSG:28405. URL: https://epsg.io/28405.

Перевірка узгодженості на стику суміжних аркушів є стандартною процедурою контролю якості для будь-якого багатоаркушевого картографічного набору, оскільки навіть незначні розбіжності в геоприв'язці кожного окремого листа здатні призвести до помітного «розриву» лінійних об'єктів, що перетинають межу аркушів, зокрема головного русла Пруту в тій частині досліджуваної ділянки, де воно проходить через зону стику М-35-123 і М-35-124. У цьому дослідженні контроль виконувався шляхом візуального зіставлення й вимірювання зсуву між відповідними елементами гідрографічної мережі та транспортної інфраструктури по обидва боки лінії стику; за відсутності суттєвого зсуву (у межах прийнятної для масштабу 1 : 100 000 похибки) обидва аркуші вважалися придатними для подальшого спільного використання як єдиної безшовної картографічної основи без додаткової корекції.

Окремим етапом до проєкту додавався сучасний супутниковий знімок Sentinel-2, завантажений через Copernicus Browser. Для досліджуваної території використовувався знімок у системі WGS 84 / UTM zone 35N, що відповідає проєкції EPSG:32635. Вибір цієї системи координат є обґрунтованим, оскільки продукти Sentinel-2 рівнів L1C і L2A поширюються як ортотрансформовані тайли в проєкції UTM/WGS84[88]. У Copernicus Browser завантаження зображення виконувалося через режим Analytical, який дає змогу експортувати дані у форматі GeoTIFF та вибирати параметри роздільної здатності й системи координат перед завантаженням[89].

Для потреб візуального дешифрування русла обиралася композиція каналів видимого діапазону з просторовою розрізненістю 10 м на піксель, що є найвищою деталізацією, доступною для основних спектральних каналів Sentinel-2 (синього, зеленого, червоного та ближнього інфрачервоного). Така роздільна здатність є цілком достатньою для впевненого візуального розпізнавання головного русла Пруту, великих островів, побічнів і ширших рукавів, ширина яких перевищує кілька десятків метрів, однак вона накладає природне обмеження на можливість дешифрування найдрібніших руслових форм, порівнянних за розміром з одним пікселем зображення. Це обмеження є симетричним до обмеження картографічної генералізації історичних і топографічних карт, розглянутого вище, і його врахування дає змогу коректно зіставляти рівень деталізації сучасного та історичних часових зрізів, не приписуючи одному джерелу вищу інформативність, ніж це дозволяє його власна просторова розрізненість.

[88] S2 Products. SentiWiki – Copernicus. URL: https://sentiwiki.copernicus.eu/web/s2-products.

[89] About the Browser. Copernicus Data Space Ecosystem Documentation. URL: https://documentation.dataspace.copernicus.eu/Applications/Browser.html.

На відміну від історичних карт, супутниковий знімок Sentinel-2 уже містив просторову прив'язку, тому його не потрібно було трансформувати за опорними точками. Після додавання знімка до проєкту перевірялася його система координат, коректність накладання на сучасну базову карту та просторове узгодження з уже прив'язаними історичними матеріалами. Усі растрові матеріали, використані в дослідженні, приводилися до єдиної робочої системи координат WGS 84 / UTM zone 35N, що забезпечило можливість коректного зіставлення різночасових положень русел.

Після завершення просторової прив'язки картографічних і супутникових матеріалів створювалися окремі векторні шари у форматі shapefile. Для уникнення змішування різночасової інформації шари формувалися окремо за кожним типом джерела. Окремий shapefile створювався для русел, дешифрованих з аркушів «Геологічного атласу Галичини»; окремий – для русел, оцифрованих із топографічних карт Генерального штабу; окремий – для сучасного положення русел, визначеного за знімком Sentinel-2. Такий підхід дав змогу чітко розмежувати джерела інформації та забезпечити подальший коректний порівняльний аналіз.

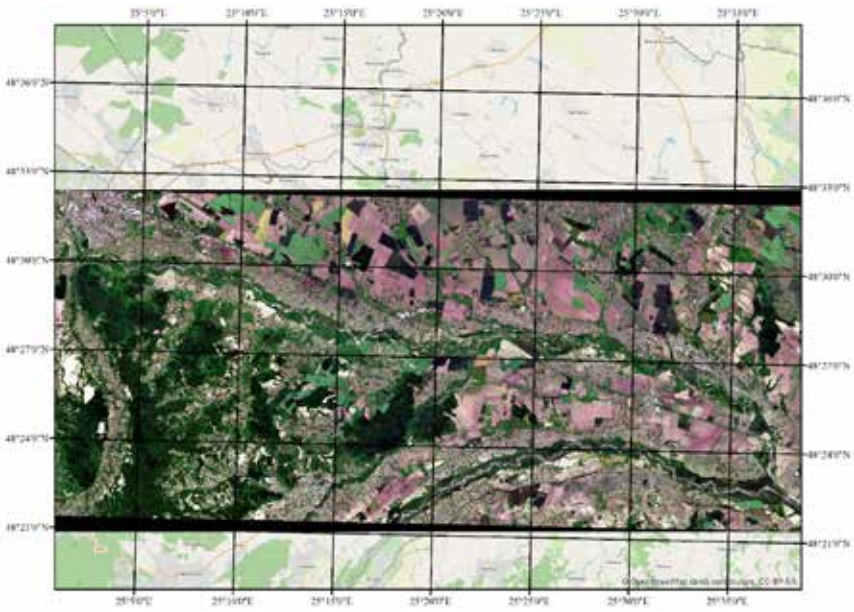


Рис. 6. Супутниковий знімок Sentinel-2 від 18.06.2025 у межах досліджуваної ділянки з нанесеною координатною сіткою

Оцифрування русел виконувалося вручну в режимі редагування. Для кожного шару створювалася атрибутивна таблиця, у якій фіксувалися назва річки, тип джерела, назва аркуша або знімка, рік або період створення матеріалу, масштаб карти, система координат, спосіб прив'язки та примітки щодо якості дешифрування. Під час окреслення русел з історичних карт основна увага приділялася саме топографічному зображенню водотоку, а не геологічним межам чи кольоровим площам, нанесеним на карту. Для карт Генерального штабу русла оцифровувалися за картографічним знаком водного об'єкта. Для знімка Sentinel-2 сучасне положення русла визначалося за фактичним положенням водної поверхні та морфологічними ознаками руслової зони.

Структура атрибутивної таблиці проєктувалася таким чином, щоб забезпечити не лише зберігання довідкової інформації про джерело, а й можливість подальшого автоматизованого групування та вибірки об'єктів під час аналізу. Окремі поля відводилися під ідентифікатор часового зрізу (що дало змогу швидко відфільтрувати об'єкти одного періоду для окремого перегляду чи overlay-операції), тип руслового елемента (головне русло, рукав, острів, стариця), а також якісну оцінку впевненості дешифрування (висока, середня, низька), яка присвоювалася кожному оцифрованому сегменту залежно від чіткості зображення джерела на відповідній ділянці. Такий рівень деталізації атрибутивної інформації є важливим для подальшої інтерпретації результатів: ділянки з низькою впевненістю дешифрування, наприклад через нечіткість друку на історичному аркуші або хмарність на окремих фрагментах супутникового знімка, розглядалися окремо й не використовувалися як самостійна підстава для висновків про інтенсивні планові переформування без додаткового підтвердження іншими джерелами.

Під час векторизації враховувалися головне русло, рукави, меандри, ділянки розгалуження, стариці, спрямлені відрізки та зони помітного зміщення русла. Якщо на карті або знімку русло мало складну багаторукавну будову, оцифрування виконувалося з максимальним збереженням планової конфігурації водотоку. На сумнівних ділянках рішення про положення лінії русла приймалося з урахуванням масштабу джерела, чіткості зображення, наявності заплавних форм і суміжних картографічних ознак.

Для розгалужених ділянок русла, де кілька рукавів мають приблизно однакову ширину й неможливо однозначно визначити «головний» рукав виключно за візуальними ознаками джерела, застосовувалося правило пріоритетності: як головне русло оцифровувався той рукав, який зберігав наскрізну прохідність і найбільшу ширину на всій довжині розгалуженої ділянки, тоді як другорядні рукави фіксувалися в атрибутивній таблиці окремою категорією. Це рішення є свідомим методологічним спрощенням

складної багаторукавної морфології, яке уможливлює послідовне порівняння положення «головного» русла між часовими зрізами, однак не применшує значення другорядних рукавів для якісного аналізу руслової динаміки: вони так само залишаються в базі даних і можуть бути окремо проаналізовані, зокрема для виявлення випадків, коли колишній другорядний рукав із часом перетворювався на головне русло, що саме по собі є однією з форм планового переформування, характерною для розгалужених ділянок Пруту.

Завершальним етапом була перевірка топологічної та просторової узгодженості створених векторних шарів. Перевірялися розриви ліній, випадкові дублювання, самоперетини, помилки напрямку оцифрування та невідповідності між сусідніми фрагментами русла. Після цього всі шари використовувалися для порівняльного аналізу планового положення русел у різні часові зрізи. Запропонована методика дала змогу поєднати історичні картографічні джерела, топографічні карти Генерального штабу й сучасні супутникові дані в єдиному ГІС-середовищі та створити основу для виявлення ділянок планових переформувань русел річок.

Вибір саме векторної, а не растрової моделі даних для представлення русла в цьому дослідженні є методологічно обґрунтованим рішенням. Векторна модель, на відміну від растрової, зберігає геометрію об'єкта у вигляді координат вершин ліній або полігонів, а не у вигляді сітки комірок з однаковим значенням атрибута, що робить її придатнішою для точного вимірювання довжини, площі та відстаней між об'єктами різних часових зрізів, необхідних, зокрема, для обчислення швидкості бічного зміщення русла. Крім того, векторний формат shapefile дає змогу приєднувати до кожного оцифрованого об'єкта детальну атрибутивну інформацію (джерело, дату, тип елемента), тоді як для растрової моделі подібна деталізація потребувала б окремого набору тематичних шарів. Водночас растрові дані – самі скановані карти та супутниковий знімок – залишалися основою для проведення власне процесу дешифрування, оскільки саме в растровому вигляді зберігається вихідна візуальна інформація про місцевість. Таким чином, у цьому дослідженні растрова й векторна моделі даних використовувалися не як альтернативи, а як послідовні етапи одного технологічного циклу – від первинного растрового зображення до узагальненого векторного шару, придатного для просторового аналізу.

Отже, опрацювання картографічного матеріалу – від геоприв'язки різночасових джерел до створення й порівняння векторних шарів русла – становить цілісний методологічний цикл, кожен етап якого безпосередньо впливає на достовірність кінцевого результату. Поєднання історичних карт «Геологічного атласу Галичини», топографічних карт Генерального штабу та сучасного супутникового знімка Sentinel-2 в єдиному ГІС-середовищі дало

змогу сформувати послідовний 141-річний ряд спостережень за плановим положенням русла Пруту, придатний для виявлення як довготривалих тенденцій, так і локальних епізодів активізації руслових процесів.

Викладена методика, поєднана з увагою до контролю точності геоприв'язки, свідомого вибору контрольних точок поза самим руслом, обліку картографічної генералізації різних джерел, створює належну основу для коректної інтерпретації результатів оверлейного аналізу, наведених у наступному розділі.

3. Руслові переформування річки Прут у межах досліджуваної ділянки

Загальна довжина досліджуваної ділянки становить близько 55 км. Саме цей відрізок обрано тому, що він охоплює широку алювіальну долину Пруту із чергуванням активних і відносно стабільних ділянок русла, значною кількістю рукавів, алювіальних осередків, заплавних понижень і ділянок бічної ерозії. Крім того, у межах цієї частини долини розташована низка населених пунктів, заплавні території яких у різні історичні періоди могли зазнавати впливу руслових процесів.

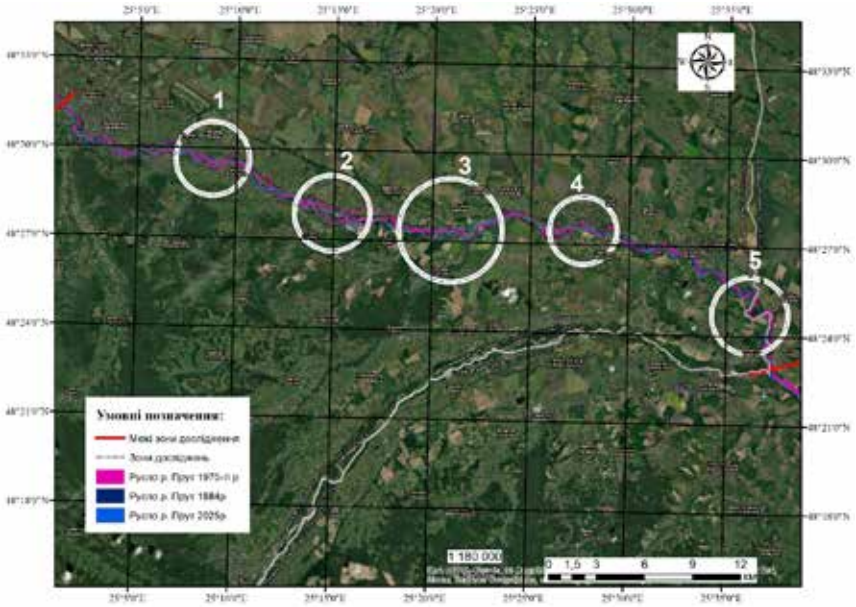


Рис. 7. Картосхема території дослідження р. Прут (ділянка від м. Коломия до гирла р. Черемош)

Для аналізу використано три основні групи матеріалів. Перший часовий зріз представлений історичними картографічними матеріалами 1884 р., які дають змогу відтворити стан русла наприкінці XIX ст., коли Прут мав більш природний, розгалужений і багаторукавний характер. Другий часовий зріз сформовано за топографічними картами Генерального штабу 1970-х років, які відображають стан русла після тривалого періоду природної міграції та початку активнішого господарського освоєння заплави. Третій часовий зріз представлений супутниковим знімком Sentinel-2 L2A за 2025 р., що дає змогу оцінити сучасне положення русла, ступінь його концентрації, спрямлення й обмеження інженерними спорудами.

Обраний період дослідження охоплює 141 рік – від 1884 до 2025 р. Такий часовий інтервал є достатнім для виявлення довготривалих тенденцій руслової еволюції: зміщення русла в межах заплави, зміни багаторукавності, звуження активної смуги руслоформування, стабілізації алювіальних поверхонь і впливу берегоукріплень. Порівняння трьох часових зрізів дає змогу простежити перехід від природно мобільного русла кінця XIX ст. до більш сконцентрованого та частково регульованого русла сучасного періоду. Проаналізувавши всю визначену територію дослідження, ми вибрали 5 найбільш унікальних ділянок для оверлейного аналізу, які описані нижче.

Вибір саме 141-річного інтервалу для порівняльного аналізу відповідає загальному методологічному принципу, згідно з яким довжина ряду спостережень має перевищувати характерний часовий масштаб досліджуваного процесу: планові переформування русла гірських і передгірних річок, до яких належить Прут, розвиваються переважно впродовж десятиліть, тому лише багаторічний, а не одноразовий чи короткостроковий ряд картографічних матеріалів дає змогу відрізнити стійкі тенденції руслової еволюції від тимчасових, оборотних коливань положення берегової лінії в межах природної мінливості річища.

Першою є ділянка, яка охоплює фрагмент долини р. Прут у районі населених пунктів Тростянка, Залуччя, Перерив, Корнич і Матіївці, виконано оверлейний аналіз різночасових положень русла. Для порівняння використане русло, оцифроване з картографічного матеріалу 1884 р., русло, виділене за топографічною картою 1970-х років, а також сучасний стан руслової зони, візуально інтерпретований за супутниковим знімком Sentinel-2 2025 р. Накладання цих матеріалів дає змогу простежити не лише зміну положення головного русла, а й загальну трансформацію багаторічної смуги руслоформування – від широкого багаторукавного русла із численними алювіальними осередками до більш сконцентрованого сучасного водотоку.

Перш ніж переходити до опису результатів по кожній із п’яти ділянок, варто нагадати методологічне застереження, викладене в другому розділі цієї роботи: наведені в подальшому оцінки амплітуди зміщення русла отримані шляхом візуального зіставлення оцифрованих контурів різночасових джерел і мають орієнтовний, а не інструментально вивірений характер. Це зумовлено як картографічною генералізацією історичних і топографічних матеріалів, так і принциповою відмінністю їхньої вихідної точності порівняно з сучасним супутниковим знімком. Тому наведені величини зміщення слід розглядати передусім як індикатори відносної інтенсивності руслових деформацій на різних ділянках і між різними часовими проміжками, що дають змогу порівнювати ділянки між собою та виявляти загальні тенденції, а не як абсолютно точні метричні характеристики, придатні для інженерних розрахунків без додаткової польової верифікації.

За картою 1884 р. русло р. Прут у межах цієї ділянки мало виразно розгалужений, розпластаний і багаторукавний характер. На картографічному зображенні (рис. 8) та за результатами векторизації простежується широка смуга руслоформування, у межах якої головний потік поділявся на кілька рукавів, між якими формувалися алювіальні острови, коси та заплавно-руслові осередки. Такий тип русла характерний для ділянок із підвищеною рухомістю наносів, значною роллю паводкових витрат і активною перебудовою руслової форми. У цей період Прут займав не вузьку лінійну позицію, а широку динамічну смугу, у межах якої відбувалося постійне перерозподілення потоку між рукавами. Саме така конфігурація свідчить про високу природну мобільність русла та про те, що заплава в цей час була тісно пов’язана з активними русловими процесами.

На відміну від стану 1884 р., русло 1970-х років уже має значно простішу планову структуру. За результатами накладання видно, що воно переважно набуває дворукавного характеру, а частина колишніх рукавів і алювіальних осередків, які фіксуються на карті 1884 р., уже не простежуються як активні елементи руслової мережі. Це свідчить про звуження активної смуги руслоформування, зменшення кількості проток і часткову деградацію багаторукавної системи. Подібна тенденція узгоджується з раніше застосованим підходом до аналізу планових руслових трансформацій, у межах якого скорочення ширини багаторічної смуги руслоформування розглядається як один із ключових індикаторів стабілізації та антропогенно-природної перебудови русла. У випадку цієї ділянки можна говорити про перехід від широкого розгалуженого русла до більш сконцентрованого, але ще не повністю однорукавного руслового типу.

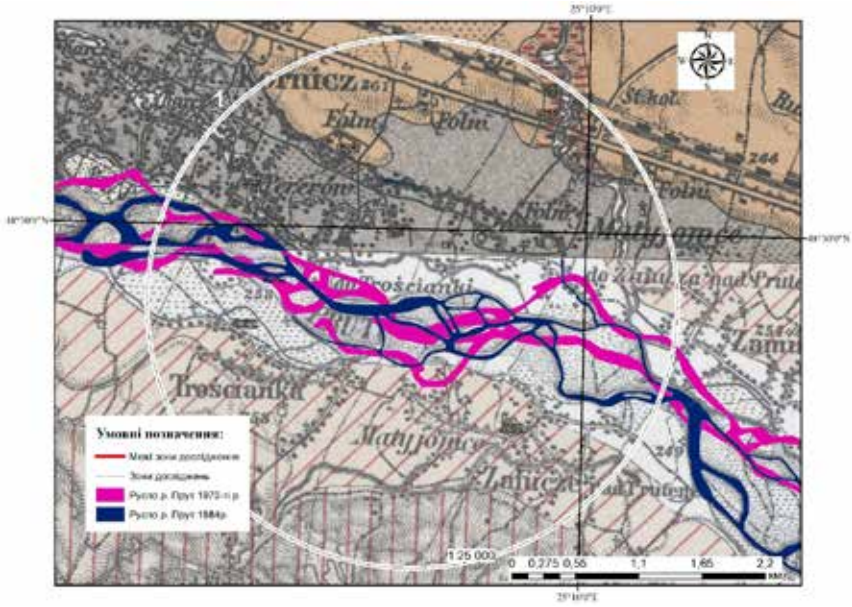


Рис. 8. Картосхема планових деформацій русла р. Прут у межах ділянки дослідження 1 на карті 1884 року

Оверлейне зіставлення русел 1884 р. і 1970-х років також фіксує суттєві латеральні зміщення русла. Найвиразніше вони проявляються в районі Залуччя та Матіївців. У районі с. Залуччя, на правобережній частині долини, за результатами візуального зіставлення спостерігається зміщення активної руслової зони орієнтовно до 200 м. Це свідчить про дію бічної ерозії, унаслідок якої річка могла поступово зрізати край заплави та наближатися до територій, які на карті 1884 р. були пов'язані з господарським або поселенським використанням. На протилежному, матіївецькому боці долини амплітуда планового зміщення місцями сягає орієнтовно 300 м (рис. 8). Тут на історичній карті позначені елементи забудови або периферійні частини населеного пункту. Це дає підстави трактувати відповідні відрізки як ділянки підвищеної історичної небезпеки бічного розмиву.

Причиною таких змін, найімовірніше, була сукупна дія природних паводкових процесів і подальшого антропогенного перетворення долини. За майже 90-річний проміжок між картографічними зрізами 1884 р. і 1970-х років у басейні Пруту неодноразово могли проходити паводкові хвилі, здатні активізувати бічну ерозію, прориватися окремі

рукави, змінювати положення головного потоку та переорієнтовувати руслові потоки в межах заплави. Водночас у другій половині XX ст. на руслові процеси дедалі більше впливали господарське освоєння заплави, транспортна інфраструктура, локальні берегоукріплення, регулювання русла та зменшення простору для вільної міграції потоку. У сукупності ці чинники сприяли звуженню активної смуги руслоформування та поступовій концентрації стоку в меншій кількості рукавів.

За відсутності проміжних картографічних зрізів між 1884 і 1970-ми роками неможливо однозначно розмежувати частку природної та антропогенної складової в зафіксованій перебудові русла на цій ділянці, і це методологічне обмеження варто чітко визнавати, а не намагатися штучно усунути шляхом довільного розподілу спостереженого зміщення між причинами. Водночас непрямим аргументом на користь істотної ролі саме природної морфодинаміки, а не суто антропогенного регулювання, є те, що характер зафіксованих змін – перехід від багаторукавного до менш розгалуженого русла, зміщення динамічної осі потоку, часткова деградація другорядних рукавів – повністю узгоджується із загальнотеоретичною моделлю природної еволюції розгалужених річищ, розглянутою в першому розділі, і не потребує обов'язкового залучення антропогенного чинника як єдиного пояснення. Найімовірнішим є поєднання обох груп чинників, що діяли в одному напрямі: природна тенденція розгалуженого русла до консолідації посилювалася паралельним господарським освоєнням долини.

Сучасний стан, відображений на супутниковому знімку Sentinel-2 за 2025 р. (рис. 9), демонструє подальший розвиток цієї тенденції. Русло р. Прут у межах ділянки 1 є значно більш сконцентрованим, переважно однорукавним і помірно меандруючим. Більша частина колишньої широкої багаторукавної смуги, яка добре простежується на карті 1884 р., у сучасному вигляді зайнята заплавною рослинністю, сільськогосподарськими угіддями або стабілізованими алювіальними поверхнями. Окремі залишки давніх рукавів і понижень можуть зберігатися в морфології заплави, однак вони вже не функціонують як активні елементи постійного русла. Це свідчить про перехід від руслової системи з високою внутрішньою розгалуженістю до русла з обмеженою латеральною рухомістю.

Виявлена на цій ділянці послідовність – від широкого багаторукавного русла 1884 р. через дворукавний стан 1970-х років до переважно однорукавного сучасного русла – узгоджується із загальнотеоретичним уявленням про розгалужені річища як морфологічно найменш стійкий тип русла, схильний за сприятливих умов (зменшення надходження наносів, обмеження простору для латеральної міграції) до поступової консолідації в менш розгалужену форму. Розглянута в першому розділі цієї роботи

концепція потужності потоку дає змогу пояснити цю тенденцію: концентрація стоку в одному руслі замість кількох рукавів підвищує питому потужність потоку на одиницю ширини річища, що сприяє самопідтримуваному поглибленню й стабілізації головного русла через відмирання другорядних проток.

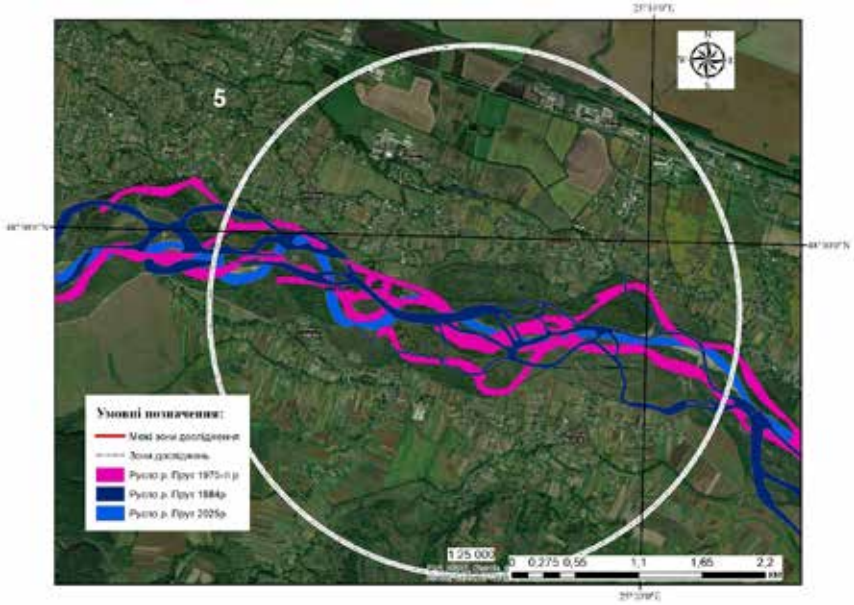


Рис. 9. Картосхема планових деформацій русла р. Прут у межах ділянки дослідження 1 на знімку Sentinel L2A

Ділянка дослідження № 2 розміщена нижче за течією від попередньої ділянки й охоплює фрагмент долини р. Прут між селами Троїця на правому березі та Борщів, Лісний Борщів і Хлібичин на лівому березі. За матеріалами 1884 р. русло р. Прут у межах цієї ділянки мало складну багаторукавну будову. Воно було розгалуженим, широким, із кількома активними протоками, алювіальними осередками, островами та заплавно-русловими пониженнями. Характерною особливістю цього стану було правобережне притиснення русла: значна частина активного потоку тяжіла до правобережної частини долини, у напрямку с. Троїця. Така конфігурація свідчить про високу рухомість руслової системи, активний перерозподіл стоку між рукавами та значну роль паводкових витрат у формуванні планової структури русла.

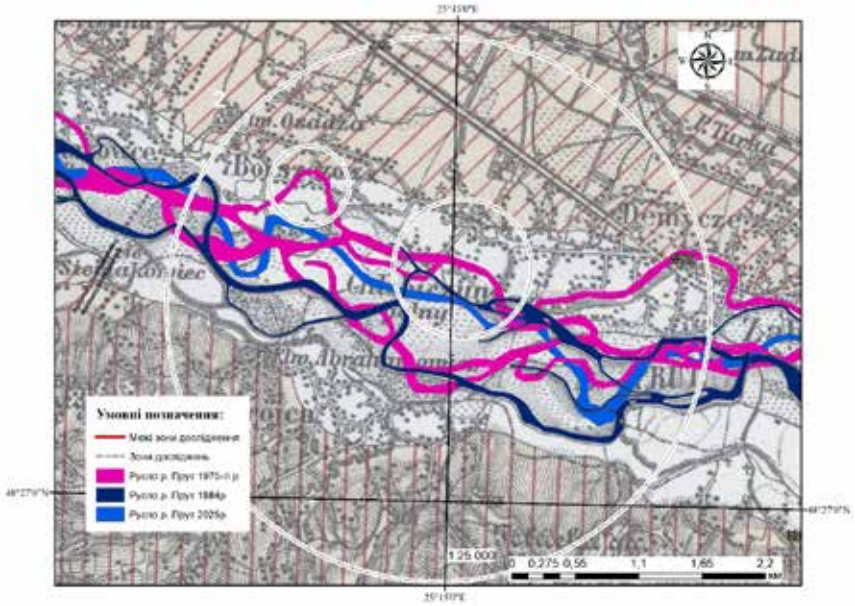


Рис. 10. Картосхема планових деформацій русла р. Прут у межах сіл Троїця та Лісний Хлібичин на карті 1884 року (ділянка 2)

Порівняння з положенням русла 1970-х років показує істотну зміну напряму руслового впливу. Якщо у XIX ст. активна частина русла була більше зміщена до правого борту долини, то в 1970-х роках домінуюча руслова смуга перемістилася до лівобережної частини. Найвиразніше це простежується в межах с. Лісний Борщів, де русло 1970-х років розмиває лівий берег і заходить у простір, який на карті 1884 р. був пов'язаний із заплавною та частково освоєною територією. На оверлейній картосхемі видно, що лівобережна звивина, сформована в цей період, активно врізалася в заплаву (приблизно на 350 метрів), а її зовнішній берег працював як зона бічної ерозії. Оскільки на історичній карті в цій частині позначені окремі будівлі або елементи поселенської структури, а на сучасній супутниковій основі вони вже не простежуються, можна зробити висновок, що берегова ерозія між кінцем XIX ст. і 1970-ми роками могла призвести до втрати частини заплавної території та пошкодження або зникнення окремих об'єктів забудови.

Візуальне зіставлення положень русел дає підстави оцінювати амплітуду зміщення в цій частині приблизно до 150 метрів у межах Лісного Хлібичина. Найбільш виразним є зміщення руслової смуги 1970-х років

відносно сучасного положення: на космознімку 2025 р. видно дамбу, до якої підходить сучасне русло і яка фактично обмежує його подальшу міграцію в бік заплави. За результатами оверлейного аналізу можна стверджувати, що після 1970-х років берегоукріплювальна споруда відтиснула активне русло приблизно на 400 м від положення, характерного для 1970-х років.

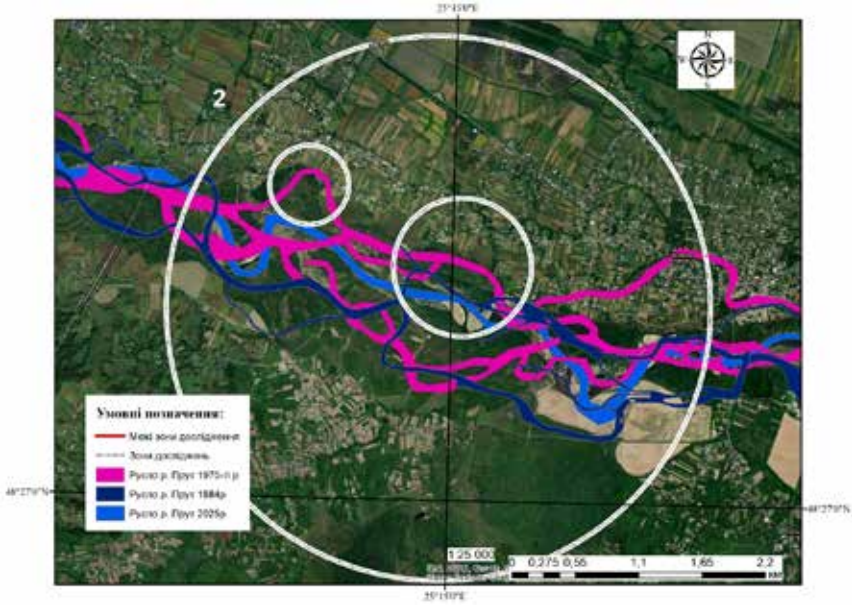


Рис. 11. Картосхема планових деформацій русла р. Прут у межах сіл Троця та Лісний Хлібичин на знімку Sentinel L2A (ділянка 2)

Подібна ситуація простежується і в районі с. Хлібичин. Тут між положеннями русла 1884 р. і 1970-х років також фіксується розмив лівобережної частини заплави. За результатами візуального вимірювання амплітуда такого зміщення становить орієнтовно до 150 м. У цій частині русло 1970-х років також займає більш лівобережне положення порівняно з історичним руслом кінця XIX ст.

Використання елементів забудови, зафіксованих на історичній карті і відсутніх на пізніших джерелах, як непрямого свідчення берегової ерозії є методологічно виправданим прийомом, оскільки будівлі, на відміну від самого русла, не є об’єктом дослідження, а отже, не можуть підозрюватися в упередженому трактуванні дослідником: зникнення зафіксованого на карті об’єкта капітальної забудови в зоні, яку пізніше зайняло русло або

активна прируслова смуга, є незалежним індикатором, що підтверджує реальність зафіксованого зміщення берегової лінії, а не є артефактом самої процедури дешифрування чи геоприв'язки. Водночас варто зазначити, що причиною зникнення окремої будівлі на історичній карті теоретично можуть бути й інші чинники, не пов'язані з русловими процесами (наприклад, руйнування чи знесення з інших причин), тому такий непрямий доказ найбільш переконливий саме в поєднанні з узгодженим напрямом і масштабом зміщення самого русла, зафіксованим під час оверлейного аналізу контурів річища.

Морфологічне порівняння трьох часових зрізів показує загальну тенденцію до спрощення руслової системи. Русла 1884 р. і 1970-х років зберігають ознаки багаторукавності: на обох часових зрізах простежуються розгалуження, залишки проток, острови та складна внутрішня структура руслового поясу. Проте русло 1970-х років уже має іншу просторову організацію, оскільки головний потік змістився до лівого берега і сформував ерозійно активні звивини біля Борщева та Хлібичина. На відміну від цих двох історичних станів, русло 2025 р. є значно більш сконцентрованим, переважно однорукавним і частково спрямленим. У його плановій структурі виділяються лише окремі невеликі підковоподібні звивини, тоді як широка багаторукавна система, властива давнішим етапам, значною мірою втрачена або закріплена заплавною рослинністю й алювіальними відкладами.

Зафіксована на цій ділянці зміна напряму притиснення русла – від правобережного в 1884 р. до лівобережного в 1970-х роках – є показовим прикладом того, як розгалужене річище може перерозподіляти основний потік між рукавами навіть за відсутності суцільної перебудови всієї руслової смуги: досить, щоб один із другорядних рукавів отримав перевагу в пропускній здатності (наприклад, унаслідок локального заростання чи замулення протилежного рукава), і він поступово перебирає на себе функцію головного русла, тоді як колишнє головне русло деградує до другорядного або відмирає. Наявність берегоукріплювальної споруди, зафіксованої на сучасному супутниковому знімку і згаданої вище, ілюструє загальний механізм антропогенного обмеження руслової рухомості, розглянутий у першому розділі: жорстка інженерна споруда фіксує положення берега на конкретній ділянці, унаслідок чого подальша природна міграція русла в цьому місці стає неможливою, а вся енергія потоку, яка раніше витрачалася б на бічну ерозію, перерозподіляється на суміжні, незахищені відтинки річища.

Ділянка дослідження № 3 розташована нижче за течією р. Прут і охоплює фрагмент долини в районі с. Рудники на правому березі та сіл

Тулуків, Олешків і Любківці на лівому березі. Для її аналізу використано оверлейне накладання трьох різночасових положень русла: русла 1884 р., оцифрованого з історичної карти, русла 1970-х років, виділеного за топографічною картою Генерального штабу, та сучасного положення русла, інтерпретованого за супутниковим знімком Sentinel-2 за 2025 р. Накладання цих даних на історичну картографічну основу та сучасний космознімок дає змогу простежити особливості довготривалої руслової еволюції на цій ділянці.

На відміну від попередніх ділянок, ділянка 3 вирізняється відносно високою стійкістю русла. За результатами оверлейного аналізу видно, що загальний тип русла впродовж періоду від 1884 р. до 1970-х років зберігався без різкої перебудови. У всі розглянуті часові зрізи річка залишалася в межах близької за конфігурацією смуги руслоформування, а амплітуда планових зміщень не досягала таких значень, як на попередньо проаналізованих ділянках. Це свідчить про відносно стабільний характер руслових процесів і меншу інтенсивність латеральної міграції потоку.

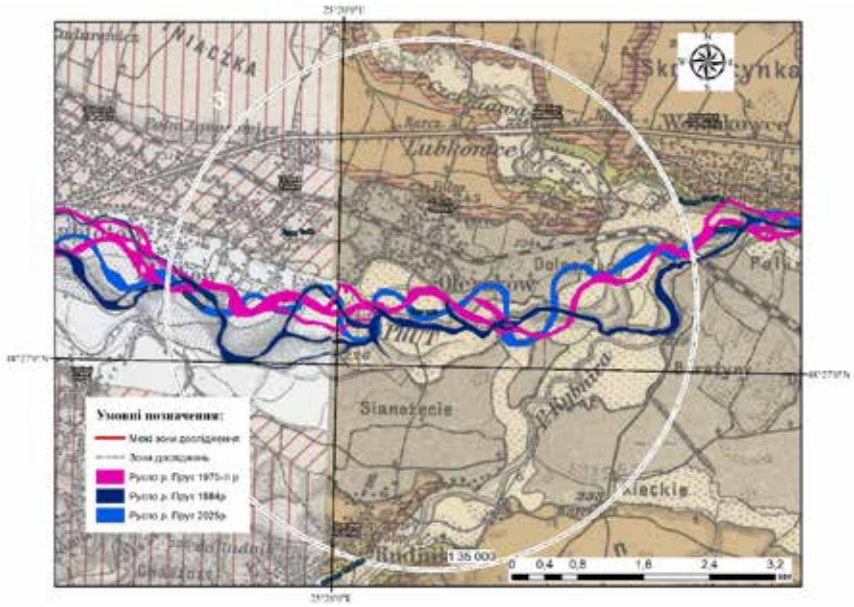


Рис. 12. Картосхема планових деформацій русла р. Прут у межах ділянки дослідження 3 (район сіл Рудники, Тулуків, Олешків і Любківці)

Разом із тим певні зміни в плановому положенні русла все ж простежуються. Русло 1884 р. мало більш виражену правобережну притиснутість, тобто головний потік у той час тяжів до правої частини днища долини (рис. 12). У 1970-х роках ця особливість загалом зберігалася, хоча положення окремих рукавів і звивин дещо змінювалося в межах активної руслової смуги. Таким чином, між кінцем XIX ст. і другою половиною XX ст. не відбулося радикальної зміни руслового типу, а основні планові деформації мали локальний характер і проявлялися переважно в перерозподілі потоку між окремими відгалуженнями та в незначних зміщеннях берегової лінії.

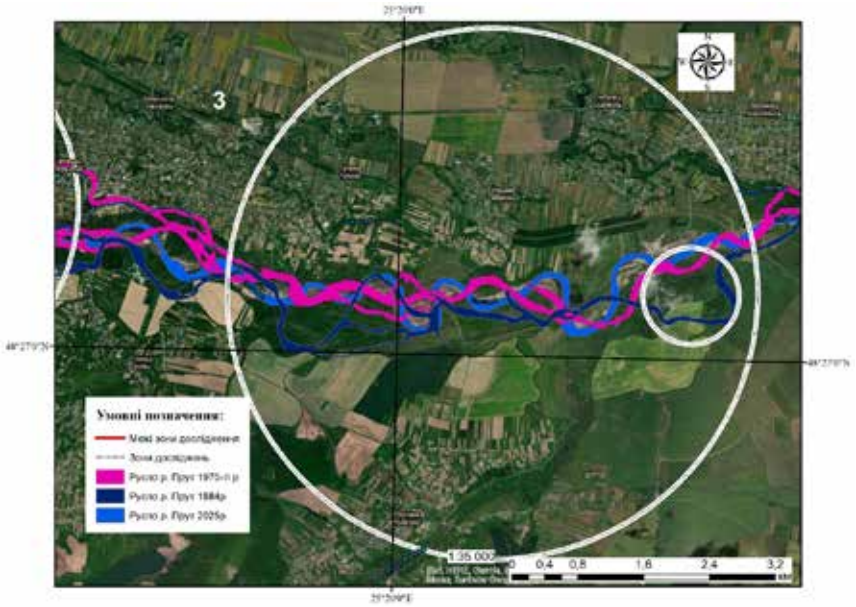


Рис. 13. Картосхема планових деформацій русла р. Прут у межах сіл Рудники, Тулуків, Олешків і Любківці на знімку Sentinel L2A (ділянка 3)

Сучасне русло, виділене за знімком (рис. 13) Sentinel-2 2025 р., демонструє іншу важливу тенденцію – зростання концентрації стоку в межах одного основного русла. Порівняно з історичними станами 1884 р. і 1970-х років сучасне русло є помітно більш сконцентрованим уздовж усієї досліджуваної ділянки. Воно має меншу внутрішню розгалуженість, а активна руслова смуга є вужчою, ніж на попередніх часових зрізах.

Це свідчить про поступове спрощення морфологічної структури русла, скорочення ролі другорядних рукавів та загальну тенденцію до стабілізації руслового потоку.

Особливо показовою є ситуація поблизу с. Рудники (рис. 13, обведена кругом ділянку заплави). Оверлейний аналіз засвідчує, що в межах заплавної ділянки, де в 1884 р. проходило активне русло або один із його рукавів, у сучасний період сформувалася інша структура землекористування. На супутниковому знімку 2025 р. ця територія представлена ріллею, що свідчить про припинення її функціонування як активної частини руслової системи. Отже, колишня руслова або прибережно-заплавна поверхня була стабілізована, вийшла з зони постійного руслоформування та згодом була залучена до сільськогосподарського використання. Така трансформація є важливою ознакою зменшення руслової активності та поступового закріплення заплавної поверхні.

Ця особливість є практичною ілюстрацією загального положення, викладеного в першому розділі цієї роботи. Звідси, заплава є не статичним елементом долини, а динамічною частиною системи «потік – русло – заплава», спроможною послідовно переходити зі стану активної руслової форми до стабілізованої заплавної поверхні й далі, за умови припинення періодичного затоплення чи прямого впливу потоку, – до території, придатної для сільськогосподарського освоєння. Водночас перетворення колишньої руслової поверхні на ріллю має і зворотний бік для оцінки природної морфодинаміки річки, адже розорювання такої ділянки означає знищення природного рослинного покриву та мікрорельєфу, який міг би слугувати додатковим джерелом інформації про колишню конфігурацію русла, а також потенційно знижує протиерозійну стійкість цієї ділянки берега на випадок, якщо річка в майбутньому знову наблизиться до цієї частини долини під час проходження надзвичайно високих паводків.

У межах лівобережної частини ділянки, в районі сіл Тулуків, Олешків і Любківці, також не простежується значних катастрофічних зміщень русла. Основні деформації мають помірний характер і виражаються в локальному зміщенні окремих звивин та незначній перебудові внутрішньої структури руслового поясу. Це дає підстави трактувати цю ділянку як відносно стабільну порівняно з іншими відрізками Пруту, де фіксуються значно активніші прояви бічної ерозії, розгалуження та зміщення потоку в межах заплави.

Порівняно вища стійкість русла на ділянці 3 відносно ділянок 1 і 2 узгоджується із загальним принципом, згідно з яким інтенсивність планових переформувань річища визначається не лише гідрологічним режимом, спільним для всього досліджуваного відрізка Пруту,

а й локальними геолого-геоморфологічними умовами конкретної ділянки долини – шириною заплави, літологічною будовою берегів і ступенем обмеження русла схилами чи терасами. Трансформація колишньої руслової поверхні поблизу с. Рудники в орну землю, зафіксована під час зіставлення карти 1884 р. із сучасним знімком, є прикладом того самого процесу стабілізації алювіальних поверхонь, який на ділянці 1 проявився через заростання колишніх рукавів заплавною рослинністю: в обох випадках територія, що раніше входила до активної смуги руслоформування, вийшла із зони постійного впливу потоку і згодом була залучена до різних форм господарського використання, що є непрямим підтвердженням реальності описаних планових переформувань за незалежними ознаками землекористування, а не лише за контуром самого русла.

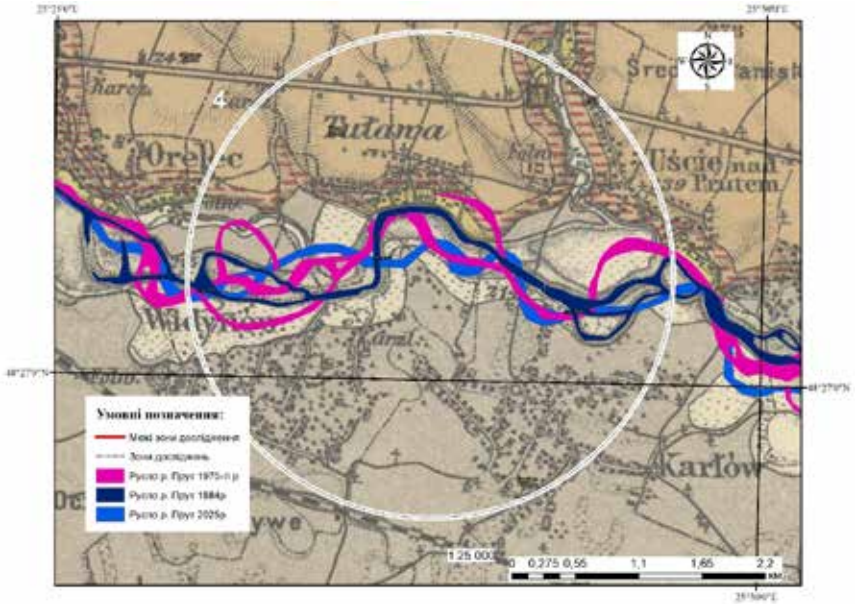


Рис. 14. Картосхема планових деформацій русла р. Прут у межах сіл Тулова і Видинів на карті кінця XIX ст. (ділянка 4)

Ділянка дослідження № 4 розташована в межах широкої долини р. Прут між селами Тулова на лівому березі та Видинів на правому березі, поблизу м. Снятин. Загалом ділянка характеризується відносно спокійним перебігом руслових трансформацій. Між 1884 р. і 1970-ми роками не відбулося суттєвої перебудови ні загального положення русла, ні його

планового рисунка. Руслова смуга впродовж цього періоду зберігала близьку конфігурацію, а основні вигини та положення рукавів залишалися в межах тієї самої широкої долинної зони. Це свідчить про відносну стійкість русла на цьому відрізку та про відсутність різких латеральних зміщень, характерних для більш активних ділянок Пруту. Водночас оверлейний аналіз виявляє локальні зміни, пов'язані насамперед із бічною ерозією лівого берега.

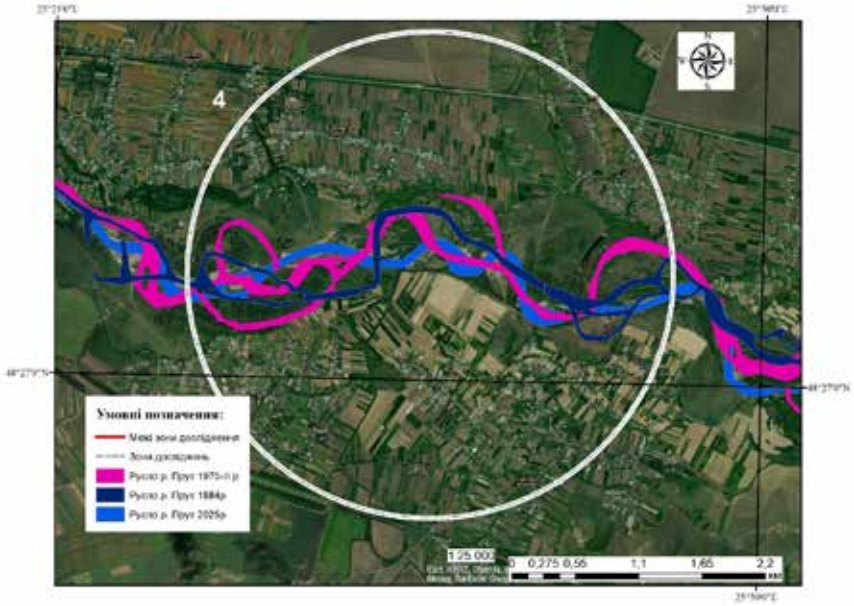


Рис. 15. Картосхема планових деформацій русла р. Прут у межах сіл Тулова і Видинів на знімку Sentinel L2A (ділянка 4)

Найбільш помітні деформації простежуються поблизу с. Тулова, де між 1884 р. і 1970-ми роками відбувся локальний розмив. Цей процес, імовірно, був зумовлений поєднанням руслової динаміки та літологічних особливостей берега. З історичної карти 1884 р. видно, що відповідна ділянка пов'язана з відкладами кварцових пісків, пісковиків і глин, для яких у легенді карти зазначено характерну фауну молюсків. Такі відклади, особливо за умов зволоження та підмивання, могли бути відносно вразливими до бічної ерозії, що сприяло поступовому відступу берегової лінії.

Сучасний супутниковий знімок Sentinel-2 L2A підтверджує, що ця частина лівобережної заплави зазнала помітної трансформації. Хоча

сам знімок відображає лише сучасний стан місцевості, його зіставлення з історичною картою та топографічним матеріалом 1970-х років дає підстави вважати, що основний етап розмиву відбувся саме в проміжку між кінцем XIX ст. і другою половиною XX ст. У межах цієї ділянки на карті 1884 р. (рис. 14) фіксується забудова вздовж прибережної вулиці, тоді як на сучасному зображенні частина цієї забудови вже не простежується. Це дає змогу припустити, що ерозійний процес призвів до руйнування частини вулиці та кількох будинків, розташованих поблизу активного берега.

Як і у випадку з ділянкою 2, тут застосовано той самий принцип непрямого підтвердження берегової ерозії через зіставлення забудови, зафіксованої на історичній карті, з її відсутністю на сучасних матеріалах. Збіг двох незалежних ліній свідчень на цій ділянці – літологічної вразливості берега, з одного боку, і зникнення прибережної забудови, з іншого, – суттєво підвищує достовірність висновку про активний розмив саме в цьому локальному осередку, а не лише в межах статистичної похибки дешифрування історичних матеріалів.

Порівняння з руслом 2025 р. показує, що в сучасний період Прут у межах ділянки 4 залишається в загалом близькому положенні до історичної смуги руслоформування, хоча сучасне русло є дещо більш сконцентрованим.

Зафіксований на цій ділянці зв’язок між літологічною будовою берега (відкладами кварцових пісків, пісковиків і глин, зазначеними на карті 1884 р.) та локалізацією найпомітнішого розмиву поблизу с. Тулова є конкретним прикладом загальної закономірності, згаданої в першому розділі цієї роботи: ділянки долини, складені пухкими піщано-глинистими відкладами, є більш вразливими до бічної ерозії, ніж відтинки зі стійкішими породами чи закріпленими берегами. Це підтверджує доцільність спільного розгляду геологічної основи долини та результатів оверлейного аналізу планових деформацій, а не їх окремої, ізольованої інтерпретації: саме літологічна вразливість конкретного відтинка берега пояснює, чому в межах загалом відносно спокійної ділянки 4 виник локалізований осередок активнішого розмиву, тоді як решта ділянки зберігала близьку до історичної конфігурацію руслової смуги.

Ділянка дослідження № 5 розташована в межах долини р. Прут між селами Завалля на правому березі та Оршівці на лівому березі. Зіставлення різночасових картографічних матеріалів показує, що ця ділянка належить до відносно стабільних відрізків русла Пруту (рис. 16).

Упродовж усього досліджуваного періоду загальний плановий рисунок русла тут залишався майже без змін. Русло 1884 р., русло 1970-х років і сучасне русло 2025 р. розміщені в межах близької смуги руслоформування.

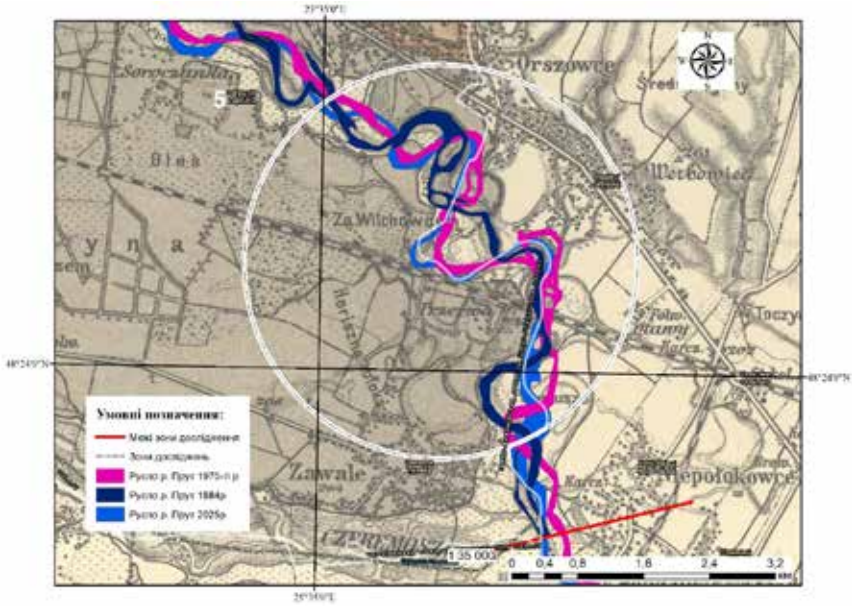


Рис. 16. Картосхема планових деформацій русла р. Прут у межах сіл Завалля й Оршівці карті кінця XIX ст. (ділянка 5)

На відміну від попередніх ділянок, де простежувалися значні латеральні зміщення, розмив заплавних частин населених пунктів або зміна напрямку притиснення русла, у межах ділянки Завалля – Оршівці таких різких переформувань не зафіксовано. Основні звивини, напрямок течії та загальна конфігурація русла зберігають спадковість упродовж усього періоду спостереження.

За картою 1884 р. русло р. Прут у цій частині мало звивистий характер із локальними розгалуженнями та алювіальними осередками. У 1970-х роках загальний рисунок русла залишався близьким до історичного, хоча окремі рукави і звивини частково змістилися в межах тієї самої руслової смуги. Це свідчить не про радикальну перебудову русла, а про його внутрішню міграцію в межах усталеного руслового поясу. Інакше кажучи, річка змінювала положення окремих елементів – рукавів, берегових ліній, островів і проток, але не виходила суттєво за межі раніше сформованої зони руслоформування.

Сучасний стан, відображений на супутниковій основі 2025 р. (рис. 17), також підтверджує відносну стабільність цієї ділянки. Русло є більш сконцентрованим порівняно з історичними матеріалами, однак його

головна вісь загалом збігається з давнішою руловою смугою. У сучасному вигляді воно має меншу кількість активних рукавів і більш чітко виражений основний потік. Частина давніх алювіальних форм і колишніх руслових ділянок стабілізована, заросла заплавною рослинністю або входить до сучасної структури заплавного землекористування. Це свідчить про поступову концентрацію стоку та звуження активної руслової зони без значного зміщення всієї руслової системи.

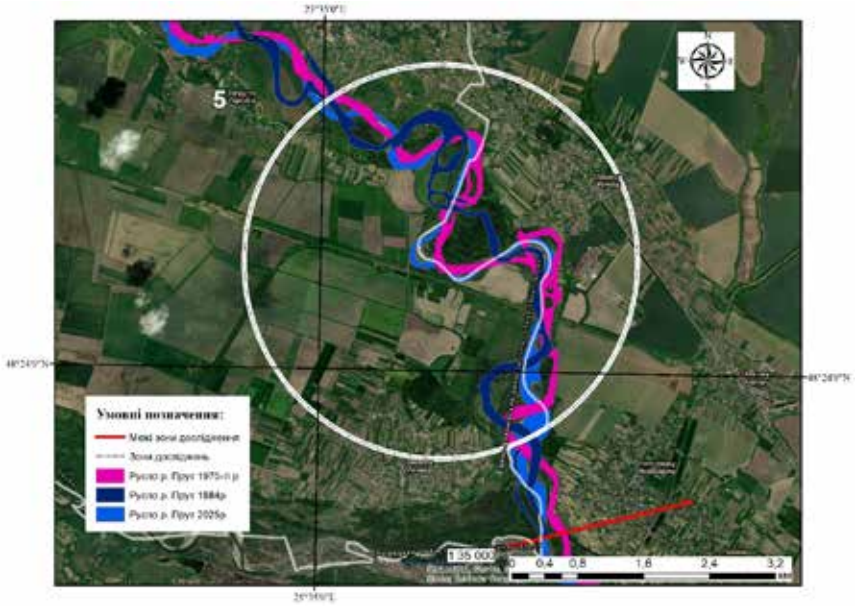


Рис. 17. Картосхема планових деформацій русла р. Прут у межах сіл Завалля і Оршівці на знімку Sentinel L2A (ділянка 5)

Узагальнюючи результати оверлейного аналізу п’яти досліджених ділянок, можна виділити спільну для всього відрізка Пруту тенденцію – перехід від широкого, багаторукавного, природно мобільного русла кінця XIX ст. до значно більш сконцентрованого, переважно однорукавного русла початку XXI ст., що проявляється з різною інтенсивністю залежно від місцевих умов: найвиразніше на ділянках 1 і 2, значно слабше на відносно стійких ділянках 3 і 5, з проміжним, локально диференційованим характером на ділянці 4. Ця просторова неоднорідність підтверджує один із головних теоретичних висновків першого розділу цієї роботи: руслові процеси не можна пояснити лише загальним гідрологічним режимом

річки, оскільки їх конкретний прояв на кожній ділянці залежить від поєднання місцевих чинників – ширини долини й заплави, літологічної будови берегів, наявності інженерних споруд і ступеня господарського освоєння прилеглої території. Саме тому виділення відносно однорідних ділянок русла і заплави виявилося придатним інструментом для виявлення такої диференціації, яку узагальнена картина руслової динаміки без поділу на окремі ділянки могла б приховати.

Спільним для більшості ділянок результатом є також зв'язок між зафіксованими на історичних картах руслами чи заплавно-русловими пониженнями та подальшою трансформацією відповідних територій у сучасні сільськогосподарські угіддя або заплавні природні комплекси, що підтверджує загальний механізм стабілізації колишніх активних елементів руслової системи. Практичне значення виявленої диференціації полягає в тому, що ділянки з підвищеною історичною інтенсивністю деформацій (передусім 1 і 2) доцільно розглядати як пріоритетні для подальшого моніторингу й обережнішого господарського освоєння прилеглих заплавних територій, тоді як відносно стабільні ділянки 3 і 5 становлять менший, хоча й не нульовий, ризик несподіваних планових переформувань.

4. Водозабірні споруди в умовах руслових переформувань річки Прут

Надійність систем питного водопостачання населених пунктів південно-східного Передкарпаття значною мірою визначається станом і стабільністю роботи водозабірних споруд, першою ланкою яких є безпосередньо водозабір. У межах регіону, зокрема в долині річки Прут між м. Коломия та гирлом р. Черемош, переважна частина малих і середніх населених пунктів забезпечується водою саме через водозабори інфільтраційного типу – споруди, дебіт яких формується завдяки природній чи частково штучній інфільтрації поверхневих вод у товщу алювіальних відкладів долини[90].

Такий тип водозабору поєднує переваги забору поверхневих вод (значні обсяги водовідбору, що забезпечуються постійним підживленням з боку річки) і підземних вод (природне очищення в товщі водоносних порід від переважної більшості механічних, хімічних і бактеріологічних забруднень). Класифікація В. С. Ковалевського виокремлює серед водозаборів з необмеженою в часі експлуатацією підземних вод три основні варіанти: власне інфільтраційні водозабори, закладені вздовж

[90] Григорійчук В. В. Перспективи розвитку інфільтраційних водозаборів в Україні. *Науковий вісник Чернівецького університету : зб. наук. праць. Серія: Географія*. Чернівці : Чернівецький нац. ун-т, 2011. Вип. 587–588. С. 27–29.

річок; водозабори на напірні води з перетіканням; а також водозабори комбінованого використання поверхневих і підземних вод, у яких річковий та підземний компоненти взаємно доповнюють один одного залежно від сезону[91]. Саме останній варіант є найпоширенішим для об'єктів, розглянутих у цьому розділі.

Історія застосування інфільтраційних водозаборів на Передкарпатті є однією з найдавніших в Україні: тоді як у східних регіонах держави зацікавлення цим типом споруд почалося переважно з 1930-х років, у Передкарпатті перші берегові інфільтраційні водозабори з'явилися ще наприкінці XIX – на початку XX століття. Так, з 1895 р. діє насосна станція «Рогізна» в м. Чернівці; у 1902 р. введено в дію водогін м. Снятин, першим джерелом якого слугували джерела урочища «Каламітний»; у 1912 р. споруджено водозабір «Магала» для потреб Чернівців. Таке раннє й послідовне освоєння інфільтраційного типу водозабезпечення пояснюється передусім сприятливими природними умовами регіону – розвиненими за площею алювіальними долинами карпатських річок, які формують потужні й добре промиті водоносні горизонти, гідравлічно зв'язані з руслом[92].

На сьогодні частка інфільтраційних водозаборів у системах водопостачання Івано-Франківської області залишається надзвичайно високою – водою з таких споруд забезпечується близько третини населення, зокрема мешканці Болехова, Долини, частково Івано-Франківська, Калуша, Коломиї, Надвірної, Снятина та Яремча. До цього переліку належать і два з трьох водозаборів, розглянутих у цьому розділі: Коломийський і Снятинський, а також водозабір селища Заболотів, розташований у межах того самого передгірного відтинка долини Пруту.

Продуктивність будь-якого берегового інфільтраційного водозабору прямо залежить від наявності стійкого гідравлічного зв'язку між водоносним горизонтом алювіальних відкладів і поверхневими водами річки. Саме тому руслові процеси, розглянуті в першому розділі цієї роботи як закономірний і безперервний вияв взаємодії потоку, наносів і берегів, є для водозабірних споруд (зокрема, інфільтраційного типу) не абстрактним теоретичним питанням, а безпосереднім експлуатаційним чинником, що визначає їхню довговічність.

---

[91] Гідроекологічне обґрунтування безпечного та збалансованого розвитку річкових природно-антропогенних систем Передкарпаття : монографія / Ю. С. Ющенко, О. М. Гончар, В. В. Григорійчук та ін. ; за ред. Ю. С. Ющенка. Чернівці : Чернівецький нац. ун-т ім. Ю. Федьковича, 2017. 472 с.

[92] Григорійчук В. В. Регіональні особливості використання інфільтраційних водозаборів у Івано-Франківській області. *Науковий вісник Чернівецького університету : зб. наук. праць. Серія: Географія*. Чернівці : Чернівецький нац. ун-т, 2013. Вип. 655. С. 23–26.

Вертикальні деформації русла, насамперед його врізання, послідовно й невідворотно послаблюють гідравлічний зв'язок водозабору з річкою. Із заглибленням дна річище поступово «виходить» з-під рівня водоносного горизонту, який раніше живився нею безпосередньо. Зв'язок через це набуває переривчастого характеру й з часом наближається до мінімуму, за якого подальша ефективна робота каптажних споруд стає неможливою[93]. Ця проблема має регіональний, а не поодинокий характер – аналогічні труднощі відзначені на цілій низці водозаборів Передкарпаття, і водозабір «Прут» м. Снятин, розглянутий далі в цьому розділі, є одним з показових її проявів.

Планові (горизонтальні) деформації русла впливають на роботу водозаборів двояко, залежно від напряму зміщення динамічної осі потоку відносно каптажних споруд. Якщо річка віддаляється від водозабору внаслідок бічної ерозії протилежного берега чи загального зміщення русла, продуктивність споруди поступово знижується через збільшення шляху фільтрації та ослаблення живлення. Якщо ж, навпаки, потік наближається до водозабору, зростає загроза прямого руйнування каптажних конструкцій, найбільш імовірного під час проходження паводкових хвиль. Обидва сценарії безпосередньо продовжують логіку класифікації планових переформувань, викладену в першому розділі цієї роботи, і знаходять емпіричне підтвердження в результатах оверлейного аналізу, представлених у третьому розділі: на дослідженій ділянці Пруту від Коломиї до гирла Черемошу ділянки 1 і 2 продемонстрували найактивнішу бічну міграцію русла (латеральні зміщення в межах 150–400 м за період 1884–2025 рр.), тоді як ділянки 3 і 5 виявилися відносно стабільними, а ділянка 4 – проміжною, з локальним осередком розмиву. Ця просторова неоднорідність руслової динаміки, виявлена в межах одного порівняно короткого відтинка долини, безпосередньо позначається на диференційованому ступені вразливості водозабірних споруд, розташованих у різних точках цього ж відтинка, особливості, на якій детальніше розглянемо для кожного з трьох аналізованих об'єктів.

Додатковим антропогенним чинником, що посилює обидва описані типи деформацій саме в зоні дії водозаборів, є видобуток гальково-гравійної суміші безпосередньо з русла й заплави. Ця практика, докладно розглянута в першому розділі цієї роботи як один із головних факторів антропогенної трансформації руслових процесів Пруту, має

[93] Гідроекологічне обґрунтування безпечного та збалансованого розвитку річкових природно-антропогенних систем Передкарпаття : монографія / Ю. С. Ющенко, О. М. Гончар, В. В. Григорійчук та ін. ; за ред. Ю. С. Ющенка. Чернівці : Чернівецький нац. ун-т ім. Ю. Федьковича, 2017. 472 с.

для інфільтраційних водозаборів особливе значення: вилучення алювію порушує природний баланс наносів, посилює врізання дна на суміжних ділянках і безпосередньо перешкоджає стабільній роботі каптажних споруд, розташованих поблизу.

Історично всі три населені пункти, водозабори яких розглянуто в цьому розділі, належать до давньо освоєних поселень Покуття. Найдавнішим документально засвідченим є Снятин: перша згадка про нього міститься в Іпатіївському літописі під 1158 р., а завдяки розташуванню на перетині торговельних шляхів Галичини, Буковини та південноєвропейських країн місто мало помітний рівень розвитку вже на початок XX ст. – за даними 1897 р., тут проживало понад 11 тис. осіб[94]. Коломия вперше згадується в Галицько-Волинському літописі під 1241 р. у зв'язку з видобутком солі; вважається одним із найстаріших міст Галичини, а з XV ст. користувалася магдебурзьким правом[95]. Селище Заболотів, розташоване на лівому березі Пруту при впадінні в нього річки Турки[96], документально відоме із середини XV ст. – перші згадки про нього містяться в книгах галицького суду (1442 р.) і Коломийській земельній книзі (1455 р.). Таке тривале історичне освоєння долини Пруту в межах усіх трьох населених пунктів опосередковано пояснює і порівняно раннє (як для регіону) виникнення тут систем централізованого водопостачання, у яких працюють споруди, що розглянуті далі.

Інфільтраційний водозабір м. Коломия розташований у його околиці на правому березі Пруту, є одним із найпотужніших водозаборів регіону – він забезпечує водою понад 60 тис. споживачів[97]. Схема споруди відповідає класичному європейському типу берегового інфільтраційного водозабору: забір поверхневої води здійснюється через ківшевий водозабір, після чого вода послідовно проходить попереднє відстоювання, інфільтрацію через систему басейнів і каптується горизонтальною дренажною галереєю.

Відомо, що продуктивність водозабору впродовж періоду експлуатації (з 1970-х рр.) зазнала суттєвих змін – проєктна потужність (з п'яти свердловин) становила 4 тис. м³/добу, а після будівництва горизонтальної галереї та влаштування інфільтраційних споруд фактична продуктивність

[94] Григорійчук В. В. Географічний аспект формування та розвитку системи водопостачання в м. Снятин Івано-Франківської області. *Науковий вісник Чернівецького університету : зб. наук. праць. Серія: Географія*. Чернівці : Чернівецький нац. ун-т, 2013. Вип. 672–673. С. 15–17.

[95] Коломия. М. В. Савчук. Енциклопедія сучасної України, 2014. URL: https://esu.com.ua/article-4169.

[96] Заболотів. Енциклопедія сучасної України. URL: https://esu.com.ua/article-17208.

[97] Григорійчук В. В. Регіональні особливості використання інфільтраційних водозаборів у Івано-Франківській області. *Науковий вісник Чернівецького університету : зб. наук. праць. Серія: Географія*. Чернівці : Чернівецький нац. ун-т, 2013. Вип. 655. С. 23–26.

зросла до 10–12 тис. м³/добу. Ця ж територія характеризується розмивними берегами, значною мутністю річкової води в паводкові періоди (що в окремі роки сягала кількох тисяч мг/л) і локальним розмивом дна безпосередньо в місці забору води на інфільтраційні басейни під час підвищеної водоподачі. Зазначене підтверджує загальну тезу про тісний і практично невіддільний зв'язок продуктивності подібних споруд із гідрологічним і морфодинамічним режимом річки.

Слід зазначити, що територіально водозабір м. Коломия розташований дещо вище за течією від ділянки дослідження 1 (Тростянка – Залуччя – Перерив – Корнич – Матіївці), яка є першою з п'яти ділянок, детально проаналізованих у третьому розділі цієї роботи методом оверлейного зіставлення різночасових картографічних матеріалів.

Водозабір «Прут» розташований на правому березі Пруту поблизу с. Хутір-Будилів і є основним джерелом централізованого водопостачання м. Снятин з 1986 р., коли його введено в експлуатацію на допомогу єдиному на той час каптажному водозабору «Каламітна» (діяв з 1902 р.). Проєктна потужність нової споруди становила 3600 м³/добу; проте фактична продуктивність із часу пуску постійно знижувалася й на сьогодні не перевищує 500 м³/добу, тобто впала майже в сім разів порівняно з проєктною[98].

Причина такого падіння задокументована безпосередньо в матеріалах спостережень за об'єктом: оскільки водозабір належить до інфільтраційного типу, рівні води у свердловинах напряму пов'язані з рівнем річкових вод, а з часу початку експлуатації спостерігалося суттєве зниження рівнів Пруту на ділянці його дії. Лише після відновлення роботи Снятинської ГЕС, розташованої дещо нижче за течією, рівень річки піднявся і продуктивність водозабору стабілізувалася на досягнутому зниженому рівні. Подальші перспективи нарощення потужності водозабору нерозривно пов'язані з необхідністю уповільнити врізання дна річки Прут в межах дії міського водозабору. Таким чином, тут логіка вертикальних руслових деформацій, розглянута в першому розділі цієї роботи, має документально підтверджений приклад прямого впливу руслових процесів на роботу конкретної інфільтраційної споруди в межах дослідженого регіону.

Водоносний горизонт, який живить водозабір, експлуатується на території станції «Прут» вертикальними свердловинами, пробуреними безпосередньо в період уведення споруди в дію (листопад 1986 р.) ударно-канатним способом. Глибина свердловини становить лише 12,0 м, при

[98] Григорійчук В. В. Географічний аспект формування та розвитку системи водопостачання в м. Снятин Івано-Франківської області. *Науковий вісник Чернівецького університету : зб. наук. праць. Серія: Географія*. Чернівці : Чернівецький нац. ун-т, 2013. Вип. 672–673. С. 15–17.

цьому геологічний розріз фіксує двошарову будову – верхні 6 м складені четвертинним галечником, який безпосередньо підстелений неогеновою сірою аргілітоподібною глиною – водотривкою породою, що обмежує водоносний горизонт знизу. Свердловина обладнана перфорованим фільтром діаметром 325 мм, робоча частина якого припадає на інтервал 0,5–5,5 м, тобто фактично на всю потужність галечникового горизонту; зафіксований рівень води – усього 0,5 м від гирла[99]. Така будова каптажного пристрою пояснює високу чутливість водозабору до найменших коливань рівня Пруту. Через відсутність потужного «буферного» водоносного горизонту навіть відносно невелике врізання русла здатне суттєво скоротити ту частину галечникової товщі, яка залишається обводненою і придатною для інфільтраційного живлення свердловин водозабору.

Територіально водозабір «Прут» потрапляє в межі ділянки дослідження 4 (відтинок долини між с. Тулова на лівому березі та с. Видинів на правому, поблизу Снятина). За результатами оверлейного аналізу різночасових положень русла на цій ділянці найпомітніший розмив за період 1884–1970-х рр. зафіксовано саме на лівому березі, поблизу с. Тулова, і пов'язаний він, зокрема, з літологічною вразливістю прибережних відкладів. Правий берег, де розташований водозабір, зберігав відносно стабільніше положення впродовж усього періоду спостережень. Це дає підстави для важливого уточнення – згадане різке падіння продуктивності водозабору «Прут» пов'язане переважно не з безпосереднім бічним підмивом каптажних споруд (від якого правобережне розташування об'єкта відносно захищене), а саме з вертикальною складовою руслових деформацій – загальним зниженням рівнів і врізанням дна на цій ділянці Пруту, яке за походженням не залежить від того, на якому саме березі перебуває споруда.

Інфільтраційний водозабір селища Заболотів розташований на лівому березі Пруту, в околиці Заболотова, поблизу Заболотівського ринку, неподалік с. Іллінці, на відстані приблизно 300–330 м від русла річки.

Територіально об'єкт розташований на межі ділянок дослідження 2 і 3 третього розділу цієї роботи, ближче до ділянки 3 (с. Рудники-Тулуків-Олешків-Любківці), яка за результатами оверлейного аналізу виявилася відносно стабільною порівняно із сусідньою ділянкою 2 (Троїця-Борщів-Хлібичин), де зафіксовано найактивнішу бічну ерозію в межах усього дослідженого відтинка (до 400 м за період 1884–1970-х рр.). Порівняно значна віддаленість водозабору Заболотова від сучасного русла (300–330 м)

[99] Паспорт свердловини на воду (м. Снятин Івано-Франківської обл.) : технічна документація. Спеціалізований трест «Укрбурвод».1986 р. 9 с.

у поєднанні з розташуванням на порівняно стабільній ділянці річища дає підстави попередньо оцінювати цей об'єкт як менш вразливий до прямих планових деформацій русла порівняно з двома іншими розглянутими водозаборами. Водночас така віддаленість не виключає потенційного впливу вертикальних деформацій чи змін гідрологічного режиму приток, зокрема безіменного струмка, що протікає поблизу (до 40 м) павільйону свердловини.

Аналіз сучасного стану трьох інфільтраційних водозаборів на досліджуваній ділянці засвідчує, що ступінь їхньої вразливості до руслових процесів безпосередньо корелює із характером та інтенсивністю деформацій русла на відповідних ділянках долини, установлених вище. Водозабір «Прут» м. Снятин є найбільш підтвердженим прикладом впливу вертикальних деформацій – врізання дна і зниження рівнів річки, тоді як для водозаборів Коломиї та Заболотова це помітно менше через різні причини. Так, продуктивність споруд м. Коломия залежить від системи інфільтраційних басейнів, куди вода подається насосами з берегового «ковша», а це згладжує негативні для нього наслідки впливу руслових деформацій. Зі свого боку, потужність системи централізованого водопостачання селища Заболотів дуже низька (менше сотні кубометрів на добу), що разом із певною віддаленістю від урізу води й розміщенням на більш стабільній ділянці берега зменшує небезпеку аварійного падіння потужностей.

Викладене підтверджує один із головних висновків загалом: планові й вертикальні переформування русла Пруту не є лише предметом суто наукового геоморфологічного інтересу, а становлять безпосередній практичний чинник, що визначає надійність систем питного водопостачання регіону. Це обґрунтовує доцільність подальшого моніторингу стану русла з використанням методики різночасового картографічного аналізу, викладеної вище.

ВИСНОВКИ

Проведене дослідження планових переформувань русла річки Прут у межах ділянки від м. Коломия до гирла р. Черемош дало змогу поєднати теоретичний, методичний, емпіричний і прикладний аспекти вивчення руслових процесів гірсько-передгірної річки в єдину послідовну структуру.

Басейн р. Прут, який поєднує риси високогірного карпатського водотоку, передгірної річки з активним надходженням наносів і рівнинного русла з розвиненою заплавою, є показовим об'єктом для дослідження планових деформацій завдяки поєднанню значної паводковості, контрастної

геолого-геоморфологічної будови долини та вираженої просторової диференціації природних умов. Теоретичний аналіз відображає, що руслові процеси є закономірним результатом взаємодії водного потоку, наносів, геологічної будови, рослинності й антропогенного впливу, а їхній конкретний прояв – плановий, вертикальний чи внутрішньорусловий, визначається унікальним поєднанням місцевих чинників на кожній окремій ділянці річища.

Розроблена й застосована методика опрацювання різночасових картографічних і дистанційних матеріалів (історичних карт «Геологічного атласу Галичини» (1888–1901 рр.), топографічних карт Генерального штабу (1977–1978 рр.) і сучасного супутникового знімка Sentinel-2 (2025 р.) дала змогу сформувати послідовний 141-річний ряд спостережень і виконати оверлейний аналіз планового положення русла в межах п'яти репрезентативних ділянок дослідженого відтинка.

За результатами оверлейного аналізу встановлено виразну просторову неоднорідність інтенсивності руслових деформацій: на ділянках у районі Тростянки – Залуччя та Троїці – Хлібичина зафіксовано найактивнішу бічну ерозію (латеральні зміщення до 150–400 м за 1884–2025 рр.) та поступовий перехід від широкого багаторукавного русла кінця XIX ст. до значно більш сконцентрованого сучасного водотоку, тоді як ділянки в районі Рудників – Тулукова та Завалля – Оршівців виявилися відносно стабільними впродовж усього періоду спостережень.

Розгляд трьох інфільтраційних водозаборів на досліджуваній ділянці (Коломийського, Снятинського та Заболотівського) практично підтверджує виявлені закономірності: ступінь вразливості водозабірних споруд до руслових процесів корелює із характером деформацій русла на відповідних ділянках долини. Найбільш показовим є падіння продуктивності водозабору «Прут» м. Снятин, спричинене врізанням дна річки, що підвищує практичне значення дослідження руслових деформацій для систем питного водопостачання населених пунктів.

Таким чином, отримані результати підтверджують, що переформування русла Пруту не лише мають теоретичний інтересу, але і є безпосереднім чинником, який варто враховувати для планування, реконструкції та експлуатації об'єктів водогосподарської інфраструктури регіону. Перспективи подальших досліджень пов'язані з розширенням переліку аналізованих ділянок річища, залученням проміжних часових зрізів для уточнення динаміки виявлених тенденцій, а також із кількісною оцінкою вразливості інших споруд на річках Передкарпаття за апробованою методикою.

АНОТАЦІЯ

У зв'язку з нагальною потребою в переході від описового, якісного розуміння руслових процесів до кількісно обґрунтованої, просторово диференційованої оцінки їхньої інтенсивності, здатної слугувати основою для рішень щодо берегоукріплення, планування забудови в заплаві й оцінки ризиків для вже наявних інженерних споруд, дослідження планових переформувань русла річки Прут мають важливе практичного значення для об'єктів водного господарства регіону. Викладено фізико-географічні умови басейну Пруту та теоретичні засади сучасного руслознавства, включно з класифікацією планових і вертикальних руслових деформацій і чинників їхнього розвитку. Розроблено й застосовано методику опрацювання різночасових картографічних і дистанційних матеріалів – історичних (1888–1901 рр.), топографічних (1977–1978 рр.) карт і супутникового знімка Sentinel-2 (2025 р.) засобами геоінформаційних систем, для формування послідовного 141-річного ряду спостережень. Оверлейний аналіз п'яти репрезентативних ділянок дослідженого відтинка показує виразну просторову неоднорідність інтенсивності руслових деформацій. Зокрема, на окремих ділянках зафіксовано активну бічну ерозію з латеральними зміщеннями до 150–400 м і перехід від широкого багаторукавного русла кінця XIX ст. до сконцентрованого сучасного водотоку. Інші ділянки виявилися відносно стабільними впродовж усього періоду спостережень. На прикладі трьох інфільтраційних водозаборів передгірної ділянки Пруту (Коломийського, Снятинського та Заболотівського) продемонстровано пряму залежність стану та продуктивності водозабірних споруд від характеру руслових процесів на відповідних ділянках долини. Отримані результати обґрунтовують потребу врахування руслової динаміки для будівництва й експлуатації об'єктів водогосподарської інфраструктури Передкарпаття.

Література

1. Гідроекологічне обґрунтування безпечного та збалансованого розвитку річкових природно-антропогенних систем Передкарпаття : монографія / Ю. С. Ющенко, О. М. Гончар, В. В. Григорійчук та ін. ; за ред. Ю. С. Ющенка. Чернівці : Чернівецький нац. ун-т ім. Ю. Федьковича, 2017. 472 с.

2. Гребінь В. В. Прут // Енциклопедія сучасної України / редкол.: І. М. Дзюба, А. І. Жуковський, М. Г. Железняк та ін. Київ : Інститут енциклопедичних досліджень НАН України, 2023. URL: https://esu.com.ua/article-879390 (дата звернення: 15.06.2026). DOI: 10.5281/zenodo.19759904.

3. Григорійчук В. В. Географічний аспект формування та розвитку системи водопостачання в м. Снятин Івано-Франківської області. *Науковий*

вісник Чернівецького університету : зб. наук. праць. Серія: Географія. Чернівці : Чернівецький нац. ун-т, 2013. Вип. 672–673. С. 15–17.

4. Григорійчук В. В. Регіональні особливості використання інфільтраційних водозаборів у Івано-Франківській області. *Науковий вісник Чернівецького університету : зб. наук. праць. Серія: Географія*. Чернівці : Чернівецький нац. ун-т, 2013. Вип. 655. С. 23–26.

5. Григорійчук В. В. Перспективи розвитку інфільтраційних водозаборів в Україні. *Науковий вісник Чернівецького університету : зб. наук. праць. Серія: Географія*. Чернівці : Чернівецький нац. ун-т, 2011. Вип. 587-588. С. 27–29.

6. Заболотів. Енциклопедія сучасної України. URL: https://esu.com.ua/article-17208 (дата звернення: 31.07.2026).

7. Коломия. М. В. Савчук. Енциклопедія сучасної України, 2014. https://esu.com.ua/article-4169 (дата звернення: 31.07.2026). DOI: 10.5281/zenodo.20002008.

8. Костенюк Л. В. Закономірності руслоформування у річковій системі Верхнього Пруту : автореф. дис. … канд. геогр. наук : 11.00.07. Чернівці, 2012. 20 с.

9. Латориця: гідрологія, гідроморфологія, руслові процеси : монографія / О. Г. Ободовський, В. В. Онищук, З. В. Розлач та ін. ; за ред. О. Г. Ободовського. Київ : ВПЦ «Київський університет», 2012. 319 с.

10. Ободовський О. Г. Гідролого-екологічна оцінка руслових процесів : на прикладі річок України. Київ : Ніка-Центр, 2001. 274 с.

11. Ободовський О. Г. Руслові процеси : підручник. Київ : Київський університет, 2017. 495 с.

12. Ободовський О. Г., Ярошевич О. Є. Гідроморфологічна оцінка якості річок басейну Верхньої Тиси / за ред. О. Г. Ободовського. Київ : Інтертехнодрук, 2006. 70 с.

13. Паланичко О. В. Закономірності руслоформування річок Передкарпаття : автореф. дис. … канд. геогр. наук : 11.00.07. Київ, 2010. 22 с.

14. Паспорт свердловини на воду (м. Снятин Івано-Франківської обл.) : технічна документація. Спеціалізований трест «Укрбурвод». 1986 р. 9 с.

15. План управління річковим басейном Дунаю на 2025–2030 роки. Суббасейни Пруту та Сірету / Державне агентство водних ресурсів України. URL: https://davr.gov.ua/plan-upravlinnya-richkovim-basejnom-dunayu1 (дата звернення: 15.06.2026).

16. Природа Івано-Франківської області / за ред. К. І. Геренчука. Львів : Вища школа, 1973. 157 с.

17. Природа Українських Карпат / за ред. К. І. Геренчука. Львів : Вид-во Львівського ун-ту, 1968. 267 с.

18. Природа Чернівецької області / за ред. К. І. Геренчука. Львів : Вища школа, 1978. 160 с.

19. Про затвердження плану управління річковим басейном Дунаю на 2025–2030 роки : розпорядження Кабінету Міністрів України від 31.12.2024 № 1347-р // База даних «Законодавство України» / Верховна Рада України. URL: https://zakon.rada.gov.ua/go/1347-2024-%D1%80 (дата звернення: 15.06.2026).

20. Руслові процеси річки Лімниця : монографія / О. Г. Ободовський, В. В. Онищук, В. В. Гребінь та ін. ; за ред. О. Г. Ободовського. Київ : Ніка-Центр, 2010. 256 с.

21. Ющенко Ю. С. Геогідроморфологічні закономірності розвитку русел. Чернівці : Рута, 2005. 320 с.

22. Ющенко Ю. С., Кирилюк А. О., Костенюк Л. В., Опеченик В. М., Паланичко О. В., Пасічник М. Д. Територіальна структура умов та проявів руслоформування річок. *Фізична географія та геоморфологія*. 2012. Вип. 2 (66). С. 72–79.

23. Ющенко Ю. С., Пасічник М. Д., Паланичко О. В., Вудвуд М. М., Закревський О. В. Природний територіальний устрій ландшафту р. Прут в межах Чернівецької області, його антропогенні трансформації та особливості функціонування системи потік – русло – заплава. *Науковий вісник Чернівецького університету. Серія: Географія*. 2023. Вип. 845. С. 41–51. DOI: https://doi.org/10.31861/geo.2023.845.41-51.

24. Ющенко Ю. С., Пасічник М. Д., Чернега П. І. Територіальна структура річкових долин. *Науковий вісник Чернівецького університету. Серія: Географія*. 2012. Вип. 612–613. С. 188–196.

25. About the Browser. Copernicus Data Space Ecosystem Documentation. URL: https://documentation.dataspace.copernicus.eu/Applications/Browser.html (дата звернення: 14.05.2026).

26. Atlas geologiczny Galicji w Archiwum WIG. Geoforum.pl. 19.05.2015. URL: https://geoforum.pl/news/19839/atlas-geologiczny-galicji-w-archiwum-wig (дата звернення: 14.05.2026).

27. Copernicus Sentinel-2 Collection 1 MSI Level-1C. Sentinel Online. URL: https://sentinels.copernicus.eu/sentinel-data-access/sentinel-products/sentinel-2-data-products/collection-1-level-1c (дата звернення: 14.05.2026).

28. EPSG Geodetic Parameter Dataset. Pulkovo 1942 / Gauss-Kruger zone 5. EPSG:28405. URL: https://epsg.io/28405 (дата звернення: 14.05.2026).

29. Fundamentals of georeferencing a raster dataset. ArcMap Documentation. Esri. URL: https://desktop.arcgis.com/en/arcmap/latest/manage-data/raster-and-images/fundamentals-for-georeferencing-a-raster-dataset.htm (дата звернення: 14.05.2026).

30. Graniczny M., Kacprzak J., Urban H., Wołkowicz S. Atlas Geologiczny Galicyi – pierwsza seryjna edycja map geologicznych ziem polskich. *Przegląd Geologiczny*. 2007. Vol. 55, nr 5. S. 368–372. URL: https://www.pgi.gov.pl/images/stories/przeglad/pg_2007_05_13.pdf (дата звернення: 14.05.2026).

31. Lane E. W. The Importance of Fluvial Morphology in Hydraulic Engineering. *Proceedings of the American Society of Civil Engineers*. 1955. Vol. 81. Paper 745. P. 1–17.

32. Leopold L. B., Wolman M. G., Miller J. P. Fluvial Processes in Geomorphology. San Francisco : W. H. Freeman and Company, 1964. 522 p.

33. Łomnicki J. Atlas geologiczny Galicyi 1 : 75 000 – Pas 10, Słup XIII, Kołomyja [карта]. Digital Library of University of Wroclaw. URL: https://bibliotekacyfrowa.pl/en/dlibra/metadatasearch?action=AdvancedSearchAction&type=-3&val1=Title%3A%22Atlas+Geologiczny+Galicyi%22 (дата звернення: 14.05.2026).

34. Łomnicki J. Atlas geologiczny Galicyi 1:75 000 – Pas 11 Słup XIV Śniatyn. Biblioteka Cyfrowa Uniwersytetu Wrocławskiego. URL: https://bibliotekacyfrowa.pl/publication/114720 (дата звернення: 14.05.2026).

35. Łomnicki J. L. M. Atlas geologiczny Galicyi: tekst do zeszytu osiemnastego: Stanisławów, Kołomyja, Śniatyn. Kraków : Nakładem Akademii Umiejętności, 1905. 145 s. Google Books. URL: https://books.google.com/books/about/Atlas_geologiczny_Galicyi.html?id=RTx60AEACAAJ (дата звернення: 14.05.2026).

36. M-35-123 Коломыя : Data Set. Indiana University DataCORE. URL: https://datacore.iu.edu/concern/data_sets/rb68xc70s (дата звернення: 14.05.2026).

37. M-35-124 Снятын (Sniatyn, Ukraine). BTAA Geoportal. URL: https://geo.btaa.org/catalog/VAC9619-003247 (дата звернення: 14.05.2026).

38. M-35-124 Снятын : Digital Collections record. Indiana University Digital Collections. URL: https://digital-collections.apps.iu.edu/ (дата звернення: 14.05.2026).

39. MacEachren A. M. How Maps Work: Representation, Visualization, and Design. New York : Guilford Press, 1995. 513 p.

40. Mapy i atlasy : katalog zbiorów kartograficznych Biblioteki Narodowej. Warszawa : Biblioteka Narodowa. URL: https://www.bn.org.pl/download/document/1533557307.pdf (дата звернення: 14.05.2026).

41. Molnár G., Timár G. Mosaicking of the 1 : 75 000 sheets of the Third Military Survey of the Habsburg Empire. *Acta Geodaetica et Geophysica Hungarica*. 2009. Vol. 44, No. 1. P. 115–120. URL: https://real.mtak.hu/82177/ (дата звернення: 14.05.2026).

42. Overview of georeferencing. ArcGIS Pro Documentation. Esri. URL: https://doc.esri.com/en/arcgis-pro/latest/help/data/imagery/overview-of-georeferencing.html (дата звернення: 14.05.2026).

43. S2 Products. SentiWiki – Copernicus. URL: https://sentiwiki.copernicus.eu/web/s2-products (дата звернення: 14.05.2026).

44. Schumm S. A. The Fluvial System. New York : John Wiley & Sons, 1977. 338 p.

45. Timár G., Biszak S., Székely B., Molnár G. Digitized Maps of the Habsburg Military Surveys – Overview of the Project of ARCANUM Ltd. (Hungary). Preservation in Digital Cartography. Berlin ; Heidelberg : Springer, 2010. P. 273–283. DOI: https://doi.org/10.1007/978-3-642-12733-5_14.

46. Zuber R. Atlas geologiczny Galicyi. Tekst do zeszytu drugiego: Nadwórna, Mikuliczyn, Żabie, Kuty, Krzyworównia, Popadia-Hryniawa. Kraków : Drukarnia Uniwersytetu Jagiellońskiego, 1888. Pedagogiczna Biblioteka Cyfrowa. URL: https://pbc.uken.krakow.pl/dlibra/publication/1160/edition/1137 (дата звернення: 14.05.2026).

Information about the authors:

Pasichnyk Mykola,
Candidate of Geographic Sciences,
Associate Professor at the Department of Ukrainian Geography and Regional Studies
Yuriy Fedkovych Chernivtsi National University
2, Kotsiubynskoho Street, Chernivtsi, Ukraine

Hryhoriichuk Vitalii,
Assistant Professor at the Department of Ukrainian Geography and Regional Studies
Yuriy Fedkovych Chernivtsi National University
2, Kotsiubynskoho Street, Chernivtsi, Ukraine

Martynova Khavruniak Andre,
Student at the Department of Ukrainian Geography and Regional Studies
Yuriy Fedkovych Chernivtsi National University
2, Kotsiubynskoho Street, Chernivtsi, Ukraine

CHAPTER 35

ПРОСТОРОВО-ЧАСОВИЙ РОЗПОДІЛ ОЖЕЛЕДО-ПАМОРОЗЕВИХ ВІДКЛАДІВ КАТЕГОРІЇ НЯ (НЕБЕЗПЕЧНІ) ТА СГЯ (СТИХІЙНІ) НА ТЕРИТОРІЇ УКРАЇНИ ПРОТЯГОМ 2021–2025 РР.

Пясецька Світлана
DOI https://doi.org/10.30525/978-9934-26-714-7-35

ВСТУП

Утворення ожеледо-паморозевих відкладів (ожеледь, налипання мокрого снігу, складні відклади) на території України є поширеним явищем кожного холодного періоду року. Такі відклади є несприятливим погодним явищем, проте окремі з них, а саме ті, що досягають критерію НЯ (небезпечних) та СГЯ (стихійних) явищ, здатні суттєво вплинути на роботу окремих ланок господарського комплексу, перешкоджаючи їх безперебійній роботі, створюючи аварійні ситуації та приносячи економічні збитки, а іноді й людські втрати. Найбільш вразливими серед ланок господарського комплексу та погодозалежними від них є електроенергетика (виробництво та передача електроенергії), транспорт (залізничний та автотранспорт), комунальна сфера (витривалість до навантаження певних конструкцій унаслідок накопичення на них мас льоду), зелене господарство (пошкодження та вилом дерев із пошкодженням поруч розташованих об'єктів господарювання). Найбільш істотні втрати відбуваються саме тоді, коли небезпечні й особливо стихійні ожеледо-паморозеві відклади поширюються на значних площах, утворюючи масовий характер прояву. Актуальність дослідження підтверджується збільшенням кількості ожеледо-паморозевих відкладів у холодний період року протягом останнього п'ятиріччя.

Огляд стану проблеми. Протягом останніх років особлива увага приділяється моніторингу сучасного стану та розповсюдження небезпечних і стихійних метеорологічних явищ, кількість яких зростає. Насамперед найбільш помітною ця тенденція виявилась у Північній півкулі саме в холодний період року, а згодом зміни поширилися на збільшення кількості небезпечних явищ у теплий період року. Вважається, що це пов'язане з глобальним потеплінням, яке відбувається у кліматичній системі

протягом останнього часу. Одним із чинників цього процесу в Північній півкулі є певні зміни в розташуванні та поширенні окремих із центрів дії атмосфери, а саме Азіатського антициклону. Протягом останнього часу спостерігаються вкрай нестійкі погодні умови із частим проходженням фронтів, різкими змінами температури повітря та випаданням рясних опадів. Із цим пов'язане збільшення кількості небезпечних зимових явищ на значній території Європи. Головним питанням при цьому було і є визначення та моніторинг динаміки кліматовразливих територій від низки метеорологічних явищ, які характерні для холодного та теплого періодів. Інформацію стосовно тенденцій до зростання негативних наслідків змін клімату від небезпечних та стихійних метеорологічних явищ викладено у відповідних матеріалах IPSS[1]: IPCC 1998[2], IPCC 2013[3], IPCC 2014: Synthesis Report. Contributions of Working Groups 1, 2, and 3 to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change[4], IPCC, 2014: Climate Change 2014. Територія України розташована в районі, на території якого останнім часом найбільш часто спостерігаються небезпечні та стихійні метеорологічні явища. Для визначення ймовірності зміни клімату та відповідних наслідків на її території було зроблено низку теоретичних модельних досліджень стосовно впливу змін глобального клімату на регіональний клімат України та подальшої імовірності різких змін погодних умов протягом останнього часу[5], а також щодо регіональних екологічних та соціально-економічних аспектів для України[6]. Найбільш детально та змістовно загальний стан

[1] IPCC 1998 (Intergovernmental Panel of Climate Change). Watson R. T., Zinoyowera M. C., etc. The regional impact of climate change. An assessment of vulnerability. Cambridge : Cambridge Univ. Press, 1998. 517 p.

[2] IPCC 2013: Summary for Policymakers. In: Climate Change 2013: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change / T. F. Stocker, D. Qin, G.-K. Plattner, M. Tignor, S. K. Allen, J. Boschung, A. Nauels, Y. Xia, V. Bex, P. M. Midgley (eds.). Cambridge, UK ; New York, USA : Cambridge University Press, 2013. 204 p.

[3] IPCC 2014: Synthesis Report. Contribution of Working Groups I, II and III to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change / Core Writing Team, R. K. Pachauri, L. A. Meyer (eds.). Geneva, Switzerland : IPCC, 2014. 163 p.

[4] IPCC 2014: Climate Change 2014: Impacts, Adaptation, and Vulnerability. Summary, Frequently Asked Questions, and Cross-Chapter Boxes. Contribution of Working Group II to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change / C. B. Field, V. R. Barros, D. J. Dokken, K. J. Mach, M. D. Mastrandrea, T. E. Bilir, M. Chatterjee, K. L. Ebi, Y. O. Estrada, R. C. Genova, B. Girma, E. S. Kissel, A. N. Levy, S. MacCracken, P. R. Mastrandrea, L. L. White (eds.). Geneva, Switzerland : World Meteorological Organization, 2014. 222 p.

[5] Гребенюк Н. П. Нове про зміни глобального та регіонального клімату в Україні на початку XXI ст. / Н. П. Гребенюк, Т. В. Корж, О. О. Яценко. *Водне господарство України*. 2002. № 5–6. 34 с.

[6] Глобальне потепління і клімат України: регіональні екологічні та соціально-економічні аспекти / В. М. Волощук, С. Г. Бойченко, С. М. Степаненко, С. Ю. Бортник, П. Г. Шищенко. Київ : ВПЦ «Київський університет», 2002. 117 с.

кліматичної системи України викладено в монографії «Клімат України»[7], де висвітлено особливості прояву різних видів метеорологічних параметрів та явищ на території України до початку 2000-х років. Дослідження, зроблені автором[8, 9], висвітлюють сучасний стан поля температури повітря та її зміни по регіонах протягом останнього тридцятиріччя (1991–2020 рр.) як одну з передумов ымовірності виникнення небезпечних або стихійних погодних явищ на території України. Особливо це стосується регіонів, де відбулася найбільша її зміна. Проблема вивчення та моніторингу випадків стихійних метеорологічних явищ протягом кінця XX – початку XXI сторіч викладено в монографії «Стихійні метеорологічні явища на території України за останнє двадцятиріччя (1986–2005 рр.)»[10]. У ній не тільки розглянуто випадки та тенденції окремих видів СГЯ на території України за досліджуване двадцятиріччя, а й зроблено припущення про ймовірні тенденції у майбутньому повторюваності низки з них.

Зважаючи на раніше виконані дослідження стосовно тенденцій у зміні клімату в Україні та розповсюдження окремих небезпечних метеорологічних явищ, натепер постає завдання подальшого моніторингу та розширення досліджень із розглядом не тільки стихійних, а й небезпечних метеорологічних явищ з огляду на те, що останні трапляються частіше та можуть охоплювати значно більшу площу розповсюдження.

Мета, предмет та об'єкт дослідження. Зважаючи на часті та різкі зміни, що відбуваються у кліматичній системі останнім часом, особливо щодо небезпечних і стихійних явищ, частота яких має тенденцію до зростання, постає необхідність здійснювати моніторинг їхніх проявів на територіях, що є до них чутливими. Для території України в холодний період року такими несприятливими явищами є ожеледо-паморозеві відклади, які можуть досягати критеріїв небезпечних (НЯ) та стихійних (СГЯ). З огляду на потенційну небезпеку таких явищ практичний інтерес дослідження полягає у з'ясуванні тенденцій розподілу їхніх окремих видів

---

[7] Клімат України / За ред. В. М. Ліпінського, В. А. Дячука, В. М. Бабіченко. Київ : Вид-во Раєвського, 2003. 343 с.

[8] Пясецька С. І., Гребенюк Н. П. Тенденції у зміні середньої місячної температури повітря у місяці теплого сезону протягом 1991–2020 рр. відносно кліматологічної норми 1961–1990 рр. / С. І. Пясецька, Н. П. Гребенюк. *Сталий розвиток: захист навколишнього середовища. Енергоощадність. Збалансоване природокористування : збірник матеріалів VII Міжнародного конгресу* (12–14 жовтня 2022 р. Україна, Львів). С. 26. https://doi.org/10.51500/7826-07-0.

[9] Пясецька С. І., Щеглов О. А., Гребенюк Н. П. Порівняння полів середньої місячної температури повітря протягом кліматичних норм 1991–2020 рр. відносно 1961–1990 рр. : колективна монографія / За ред. М. С. Мальованого. Київ : Ярошенко Я. В., 2022. С. 202–228. https://doi.org/10.51500/7826-23-0.

[10] Стихійні метеорологічні явища на території України за останнє двадцятиріччя (1986–2005 рр.) / За ред. В. М. Ліпінського, В. І. Осадчого, В. М. Бабіченко. Київ : Ніка-Центр, 2006. 311 с.

протягом місяців холодного періоду на території низки регіонів країни для визначення найвразливіших із них.

Метою представленого дослідження є з'ясування сучасних тенденцій у розповсюдженні різних видів ожеледо-паморозевих відкладів, які досягли критерію НЯ та СГЯ у різних регіонах України на сучасному етапі зміни клімату. *Предметом* дослідження були випадки відкладів ожеледі, налипання мокрого снігу та складні відклади, які досягли критерію НЯ (небезпечних) та СГЯ (стихійних). *Об'єктом* дослідження було просторово-часове розповсюдження таких відкладів у різних регіонах держави.

Для досягнення мети необхідно було визначити розподіл випадків небезпечних та стихійних ожеледо-паморозевих відкладів протягом окремих років п'ятиріччя та місяців холодного періоду року, встановити їх просторово-часовий розподіл та повторюваність, зокрема внесок окремих областей у їх загальну кількість протягом сучасного періоду зміни клімату. Крім того, необхідно з'ясувати тенденції до ймовірності різних видів ожеледо-паморозевих відкладів.

Матеріали та методи. Матеріалами для дослідження слугували таблиці, які містять результати інструментальних спостережень за ожеледо-паморозевими відкладами на дротах стандартного ожеледного станка, які розміщені в Метеорологічних щомісячниках, що видаються в Центральній геофізичній обсерваторії імені Бориса Срезневського в Києві. Основним методом дослідження був емпірико-статистичний метод із побудовою серії гістограм повторюваності досліджуваних явищ за окремими місяцями холодного періоду року та територіально по окремих областях України. Опрацювання матеріалів здійснювалось з урахуванням керівних[11] та нормативних[12] документів [3; 5], які застосовуються у проведенні спостережень на метеорологічних станціях України, передачі ними інформації та в роботі Українського гідрометеорологічного центру з прогнозування.

Виклад основного матеріалу. Результати проведеного дослідження викладено у трьох розділах: 1. «Відклади ожеледі категорії НЯ (небезпечні) та СГЯ (стихійні)», 2. «Відклади налипання мокрого снігу категорії НЯ (небезпечні) та СГЯ (стихійні)», 3. «Складні відклади категорії НЯ (небезпечні) та СГЯ (стихійні)».

[11] Керівний документ КД 52.3.2.03-13. Код для передавання штормових оповіщень про фактичні небезпечні та стихійні гідрометеорологічні явища (Код WEREP) Ч. І. Ч. ІІ. Київ, 2013. 45 с.

[12] Нормативний документ. Настанова з метеорологічного прогнозування. Український гідрометеорологічний центр. Київ, 2019. 36 с.

1. Відклади ожеледі категорії НЯ (небезпечні) та СГЯ (стихійні)

1.1. Відклади ожеледі категорії НЯ

Протягом місяців холодного періоду року п'ятиріччя (2021–2025 рр.) на території України спостерігалося 104 випадки відкладів ожеледі категорії НЯ (небезпечна). Досліджено розподіл кількості випадків ожеледі категорії НЯ за окремими роками та місяцями досліджуваного періоду, результати якого представлено на рис. 1 та в таблицях 1 та 2. За окремими роками досліджуваного періоду встановлено, що найбільше таких випадків спостерігалося в січні 2021 року – 11 випадків, що становило 47,8 % загалу, та в січні 2024 року – 8 випадків (34,8 %). У лютому 2021–2025 рр. найбільше випадків відкладів ожеледі категорії НЯ спостерігалося в січні 2021 р., що становило 15 випадків, або 75,0 % загалу за п'ятиріччя. Крім того, такі відклади також спостерігалися у 2024 р. (5 – 25,0 %). У березні протягом 2021–2025 рр. випадків із відкладами ожеледі категорії НЯ не спостерігалося. У квітні та жовтні цього періоду встановлено лише по 1 випадку таких відкладів у 2024 році. У листопаді випадків із відкладами ожеледі категорії НЯ було 17, переважна кількість яких спостерігалася у 2022 р. (15 – 88,2 %). У грудні 2021–2025 рр. загальна кількість випадків із такими відкладами зросла до 42. З них найбільша кількість припала на 2021 та 2023 рр., що становило 42,9 та 33,3 % відповідно (рис. 1).

Для з'ясування структури розподілу кількості випадків із відкладами ожеледі категорії НЯ за окремими роками та місяцями холодного періоду 2021–2025 рр. було складено таблиці 1 та 2. З'ясовано, що серед років досліджуваного періоду найбільшу кількість випадків ожеледі категорії НЯ на території України зафіксовано у 2021 році – 45 випадків, що становило 43,3 % загалу за п'ятиріччя. Також істотний внесок у загальну кількість таких випадків зробили 2022 та 2024 рр. – відповідно 19,2 та 17,3 % (табл. 1). За окремими місяцями 2021–2025 рр. основний внесок у загальну кількість таких відкладів протягом досліджуваного п'ятиріччя належить січню, лютому, листопаду та грудню, що у відсотках становило 22,1, 19,2, 16,3 та 40,4 % відповідно. Тобто основний внесок у загальну кількість таких відкладів протягом 2021–2025 рр. належить зимовим місяцям (табл. 2).

Таблиця 1

Кількість та повторюваність (%) випадків відкладів ожеледі категорії НЯ на території України за окремими роками протягом 2021–2025 рр.

Показник	Роки					Усього
	2021	2022	2023	2024	2025	
Кількість	45	20	17	18	4	104
Повторюваність,%	43,3	19,2	16,3	17,3	3,8	100,0

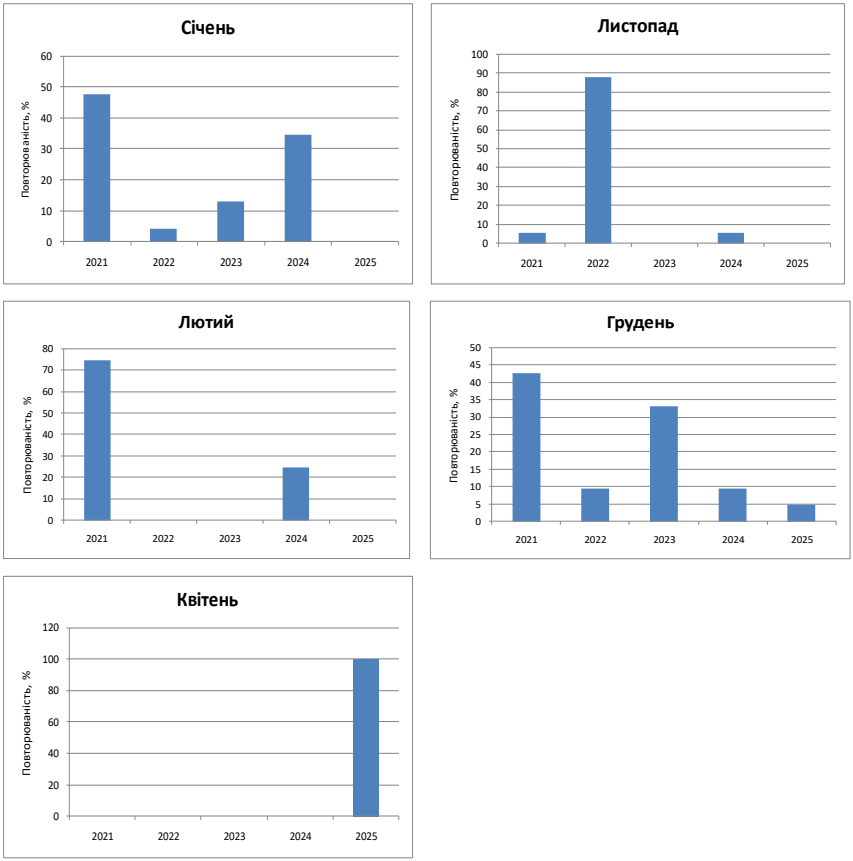


Рис. 1. Повторюваність випадків відкладів ожеледі категорії НЯ за окремими місцями протягом 2021–2025 рр.

Таблиця 2

Кількість та повторюваність (%) випадків відкладів ожеледі категорії НЯ на території України за окремими місяцями протягом 2021–2025 рр.

Показник	Місяці							Усього
	I	II	III	IV	X	XI	XII	
Кількість	23	20	0	1	1	17	42	104
Повторюваність,%	22,1	19,2	0,0	1,0	1,0	16,3	40,4	100,0

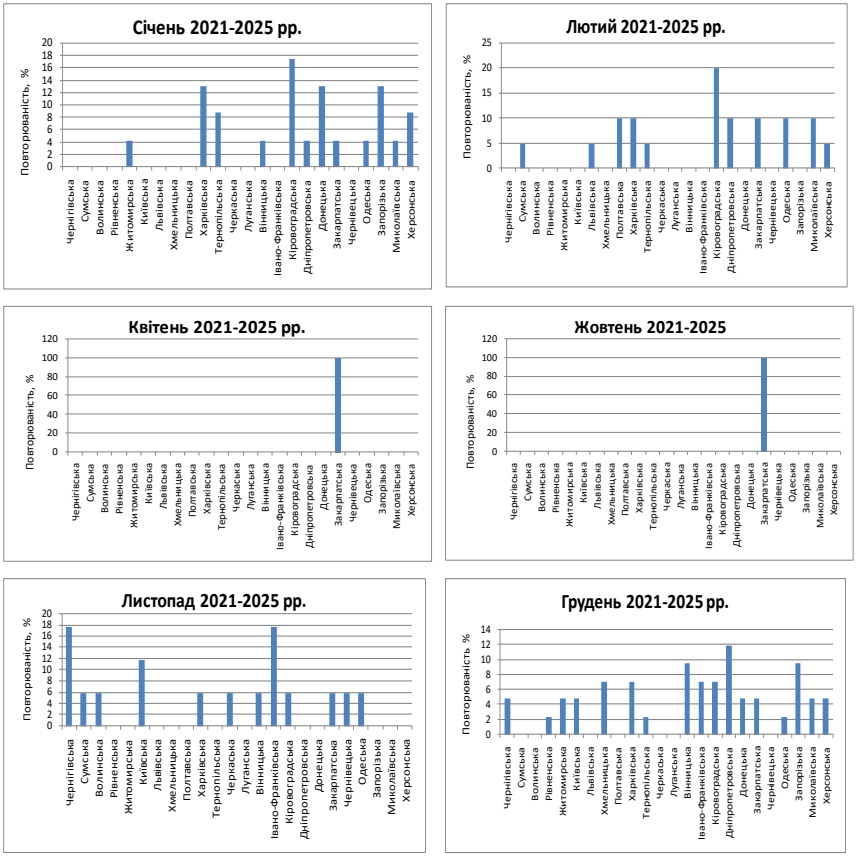


Рис. 2. Повторюваність кількості випадків відкладів ожеледі категорії НЯ в областях протягом 2021–2025 рр.

** Примітка. Для окремих територій сходу України (Луганської, Донецької областей) інформація наявна по початок 2022 р. у зв'язку з початком військових дій. Інформація щодо АР Крим відсутня повністю з 2014 р.*

Окремо постає питання щодо просторово-часового розподілу відкладів ожеледі категорії НЯ на території України із з'ясуванням, яка частина території (область) є найбільш вразливою до таких відкладів. Результати дослідження наведено на рисунку 2, де представлено гістограми для кожного з досліджуваних місяців п'ятиріччя з урахуванням усіх областей країни, крім АР Крим. Проведене дослідження встановило, що в січні

2021–2025 рр. випадки відкладів ожеледі категорії НЯ були поширені на території 12 областей, здебільшого на Кіровоградщині – 4 випадки (17,4 %), Харківщині, Донеччині та Запоріжжі – по 3 в кожній (13,0 %). У лютому вони спостерігалися в 11 областях. Здебільшого їх повторюваність по областях перебувала в межах від 5,0 до 10,0 %, проте на Кіровоградщині їх повторюваність становила 20,0 %. У березні протягом 2021–2025 рр. випадків ожеледі категорії НЯ не спостерігалось. У квітні та жовтні цього періоду відклади ожеледі категорії НЯ спостерігалися тільки на Закарпатті на Плаю. У листопаді такі відклади були розповсюджені на території 12 областей. Переважно їх повторюваність за п'ятирічний період становила 5,9 % для більшості областей, де вони спостерігались, проте для 3 областей – Київщини, Чернігівщини та Івано-Франківщини – їх повторюваність була значно більшою. Так, повторюваність таких випадків на Київщині становила 11,8 %, а на Чернігівщині та Івано-Франківщині – по 17,6 %, тобто спостерігається деяке розширення кількості областей, де частіше виникають такі відклади. У грудні розповсюдження випадків відкладів ожеледі категорії НЯ була найбільшим, вони спостерігалися на території 17 областей. Досить часто повторюваність в областях таких відкладів, де вони спостерігалися, становила від 2,4 до 4,8 %, проте на Івано-Франківщині, Хмельниччині та Харківщині повторюваність становила 7,1 %, на Вінничині та Запоріжжі – 9,5 %, а на Дніпропетровщині – 11,9 %.

1.2. Відклади ожеледі категорії СГЯ

Випадки відкладів ожеледі категорії СГЯ (стихійна) на території України протягом 2021–2025 рр. спостерігалися здебільшого лише в окремі роки і на незначній території. Результати дослідження відображено на рис. 3 та в таблицях 3 та 4. Загалом було виявлено 19 випадків відкладів ожеледі категорії СГЯ. За окремими роками п'ятиріччя в січні найбільше таких відкладів на території України спостерігалось у 2024 році (5 випадків), що становило 71,4 % від загальної кількості за п'ятиріччя. У лютому досліджуваного періоду такі відклади спостерігалися по 1 у 2022, 2023 та 2024 роках, що відповідно становило по 33,3 % для кожного з них. У березні відклади ожеледі категорії СГЯ на території України не спостерігались. У квітні спостерігався лише 1 випадок таких відкладів у 2025 році. У жовтні досліджуваного п'ятиріччя відкладів ожеледі категорії СГЯ не спостерігалося. На початку передзим'я у листопаді 2021 року спостерігався 1 випадок таких відкладів. У грудні періоду 2021–2025 рр. найбільша кількість таких випадків спостерігалась у 2021 р. – 3 (42,9 %) та у 2024 р – 2 (28,6 %). Враховуючи внесок у загальну кількість таких випадків кожного окремого року досліджуваного п'ятиріччя, можна

сказати, що найбільший внесок у загальну кількість таких випадків зробили 2021 та 2024 рр. – 21,1 та 42,1 % відповідно (табл. 3). На решту з досліджуваних місяців припало від 10,5 до 15,8 %. Особливості розподілу кількості випадків відкладів ожеледі категорії СГЯ за окремими місяцями досліджуваного періоду представлено в таблиці 4. Встановлено, що в досліджувані місяці найбільша кількість випадків відкладів ожеледі категорії СГЯ спостерігалася в січні – 36,8 %, лютому – 15,8 % та грудні 36,8 % від загальної кількості за п'ятиріччя.

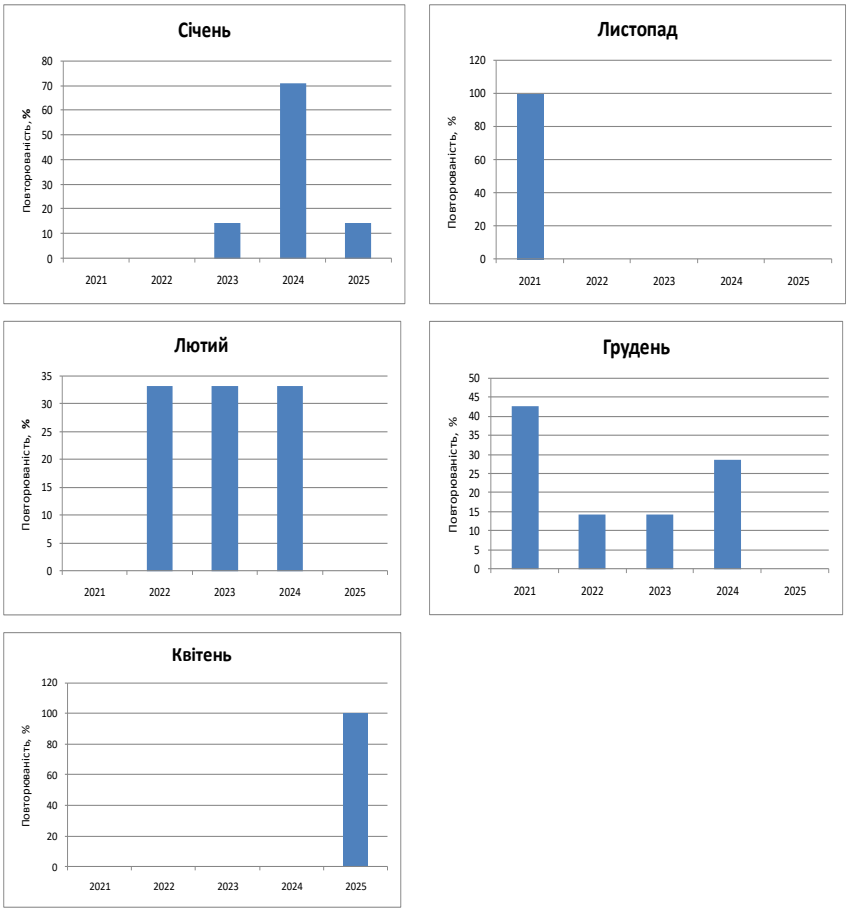


Рис. 3. Повторюваність випадків відкладів ожеледі категорії СГЯ за окремими місцями протягом 2021–2025 рр.

Просторово-часовий розподіл відкладів ожеледі категорії СГЯ відображено на рис. 4. Встановлено, що в січні 2021–2025 рр. основна кількість таких випадків спостерігалася на Закарпатті в районі Плаю – 4 випадки, що становило 57,1 % загалу. Крім того, окремі з таких випадків спостерігалися на Кіровоградщині – 2 (28,6 %) та Дніпропетровщині – 1 (14,3 %). У лютому, квітні та листопаді поодинокі випадки відкладів ожеледі категорії СГЯ спостерігалися лише на Закарпатті у Плаю. У грудні відклади ожеледі категорії СГЯ дещо більш поширилися за територію прояву порівняно із січнем, хоча за їх кількістю ситуація не змінилася. Найбільша їх кількість спостерігалася на Закарпатті – 3 випадки, що становило 42,9 % загалу, на Донеччині – 2 випадки (28,6 %) та в Миколаївській та Херсонській областях – по 1 випадку, що становило по 14,3 % для кожної.

Таблиця 3

Кількість та повторюваність (%) випадків відкладів ожеледі категорії СГЯ на території України за окремими роками протягом 2021–2025 рр.

Показник	Роки					Усього
	2021	2022	2023	2024	2025	
Кількість	4	2	3	8	2	19
Повторюваність,%	21,1	10,5	15,8	42,1	10,5	100,0

Таблиця 4

Кількість та повторюваність (%) випадків відкладів ожеледі категорії СГЯ на території України за окремими місяцями протягом 2021–2025 рр.

Показник	Місяці							Усього
	I	II	III	IV	X	XI	XII	
Кількість	7	3	0	1	0	1	7	19
Повторюваність,%	36,8	15,8	0,0	5,3	0,0	5,3	36,8	100,0

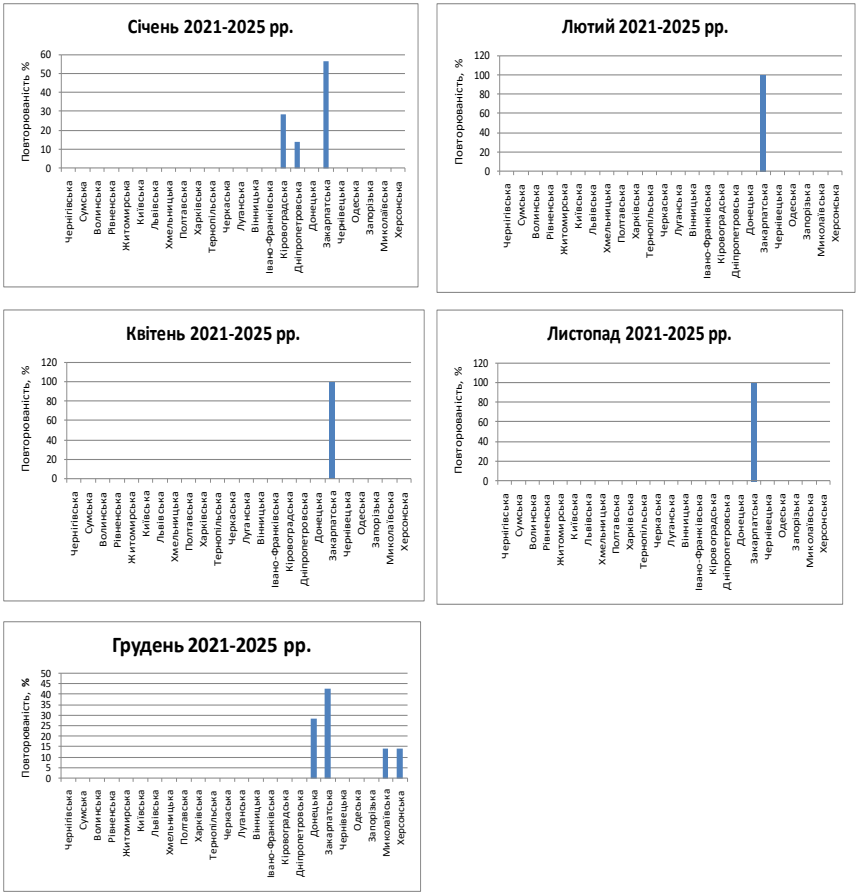


Рис. 4. Повторюваність кількості випадків відкладів ожеледі категорії СГЯ в областях протягом 2021–2025 рр.

2. Відклади налипання мокрого снігу категорії НЯ (небезпечні) та СГЯ (стихійні)

2.1. Відклади налипання мокрого снігу категорії НЯ

Серед ожеледо-паморозевих відкладів, крім ожеледі, досить поширеними є відклади налипання мокрого снігу, які останнього часу, зважаючи на формування умов, пов'язаних із потеплінням, трапляються все частіше, а також збільшується часовий проміжок їх виникнення. Це сприяє збільшенню повторюваності таких відкладів та розширює ареал

їх розповсюдження. Протягом досліджуваного п'ятиріччя загалом було зареєстровано 135 випадків відкладів налипання мокрого снігу категорії НЯ. Результати дослідження представлено на рис. 5 та 6, а також у таблицях 5 та 6. За окремими роками розподіл їх кількості був таким: у січні найбільша кількість таких відкладів спостерігалась у 2021 р. – 10 (37,0 %), у 2023 р. – 5 (18,5 %) та у 2025 р. – 6 (22,2 %). У 2022 та 2024 рр. кількість таких випадків становила відповідно 2 (7,4 %) та 4 випадки (14,8 %). У лютому переважаюча кількість випадків відкладень мокрого снігу категорії НЯ спостерігалась у 2022 р. – 9 (39,1 %), а також у 2023 та 2025 роках – по 6 у кожному з них, що становить 26,1 %. В інші роки – 2021 та 2024 рр. – такі випадки були поодинокими. У лютому досліджуваного періоду основна кількість таких відкладів спостерігалась у 2021 р. – 8 (61,5 %). Поодинокі випадки таких відкладів спостерігались у 2024 та 2025 рр. У 2022 та 2023 рр. відкладів мокрого снігу категорії НЯ не спостерігалось. У квітні відкладів мокрого снігу було небагато. Здебільшого вони спостерігались у 2022 році – 3 (75,0 %) і лише 1 (25,0 %) у 2025 р. В інші роки п'ятиріччя вони не спостерігалися на території України. У жовтні періоду 2021–2025 рр. вони також не спостерігалися. У листопаді та грудні кількість таких відкладів різко зросла й перевищила їх кількість у січні. Так, у листопаді майже половина таких відкладів спостерігалась у 2024 році – 15 (46,9 %), у 2023 р. – 9 випадків (28,1 %). У грудні, на відміну від листопаду, основна кількість таких випадків спостерігалася на початку п'ятиріччя, у 2021 р. – 24 (66,7 %). В інші роки їх кількість становила від 1 у 2024 та 2025 рр. (2,8 %) до 7 у 2023 р., що становило 19,4 %. Загалом встановлено, що найбільше випадків налипання мокрого снігу категорії НЯ на території України спостерігалось у 2021 та 2023 рр., внесок цих років у загальну кількість таких випадків відкладів становив 31,8 та 20,0 % відповідно. На решту років припало від 14,8 до 17,0 %. (табл. 5). Дослідження розподілу повторюваності випадків із налипанням мокрого снігу за окремими місяцями показало, що основний внесок у загальну кількість таких відкладів зробили січень – 20,0 % та особливо листопад і грудень – 23,7 та 26,7 % відповідно (табл. 6).

Таблиця 5

Кількість та повторюваність (%) випадків відкладів налипання мокрого снігу категорії НЯ на території України за окремими роками протягом 2021–2025 рр.

Показник	Роки					Усього
	2021	2022	2023	2024	2025	
Кількість	43	22	27	23	20	135
Повторюваність,%	31,8	16,3	20,0	17,0	14,8	100,0

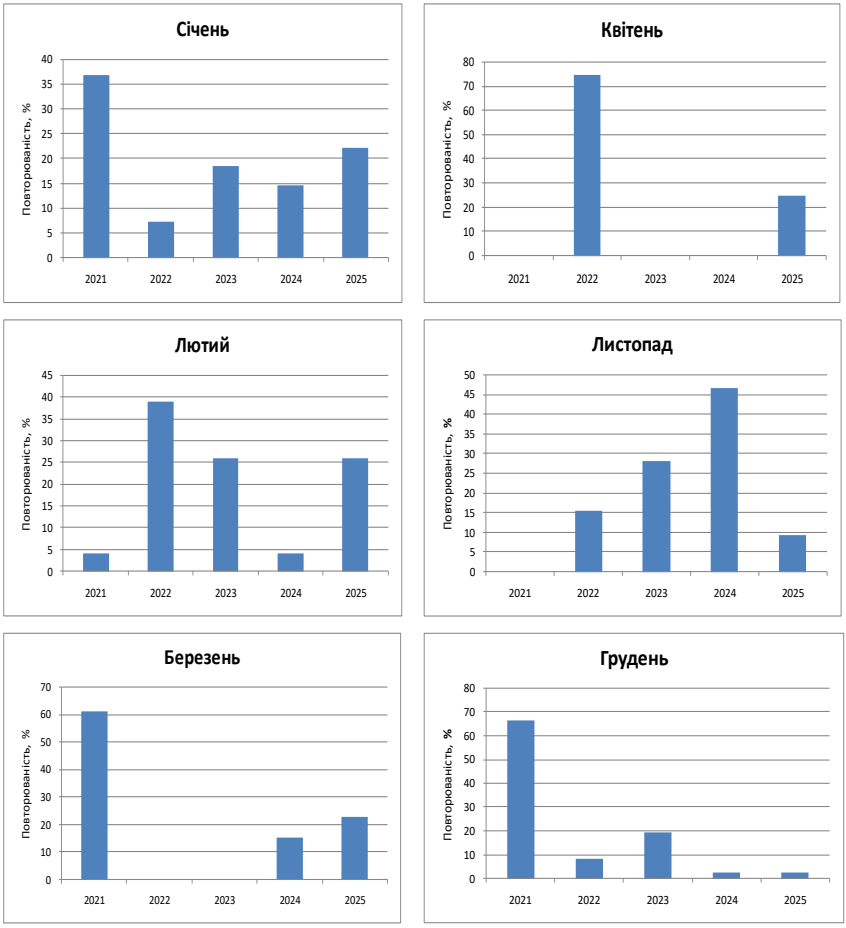


Рис. 5. Повторюваність випадків відкладів налипання мокрого снігу категорії НЯ за окремими місцями протягом 2021–2025 рр.

Таблиця 6

Кількість та повторюваність (%) випадків відкладів налипання мокрого снігу категорії НЯ на території України за окремими місяцями протягом 2021–2025 рр.

Показник	Місяці							Усього
	I	II	III	IV	X	XI	XII	
Кількість	27	23	13	4	0	32	36	135
Повторюваність,%	20,0	17,0	9,6	3,0	0,0	23,7	26,7	100,0

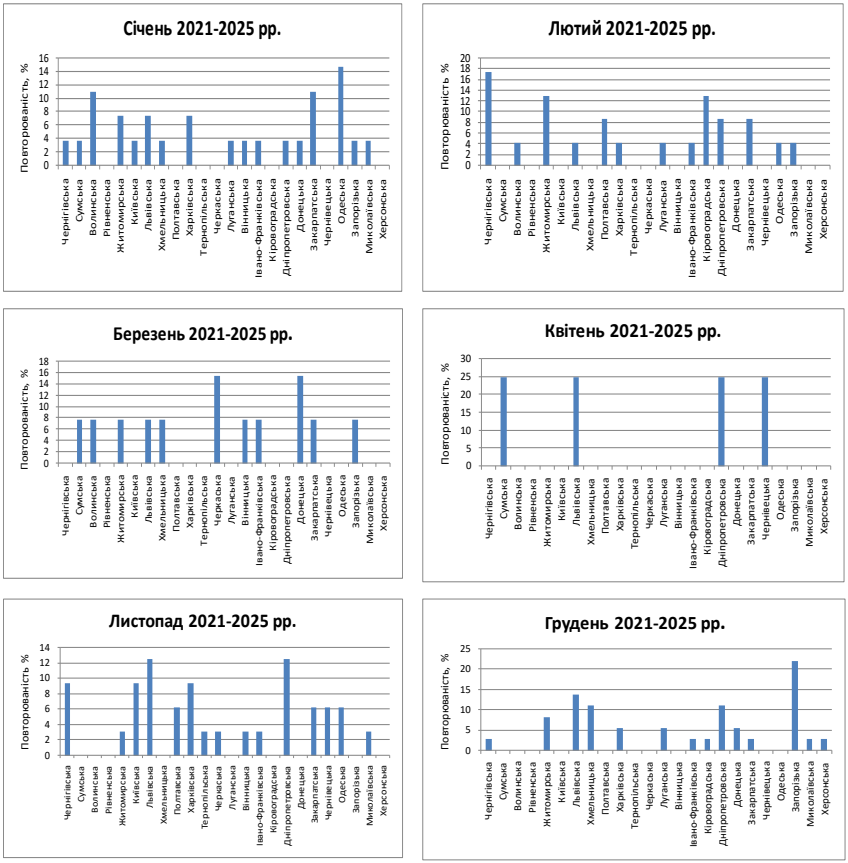


Рис. 6. Повторюваність кількості випадків відкладів налипання мокрого снігу категорії НЯ в областях протягом 2021–2025 рр.

Результати дослідження просторово-часового розповсюдження випадків відкладів мокрого снігу протягом 2021–2025 рр. представлено на рис. 5. Стосовно просторово-часового розподілу відкладів налипання мокрого снігу категорії НЯ можна сказати, що в областях найчастіше вони спостерігалися в січні на Одещині (14,8 %), Закарпатті та Волині (по 11,1 %). На Львівщині, Житомирщині та Харківщині їх повторюваність становила 7,4 %. Повторюваність в інших областях становила 3,7 %. Загалом у січні такі відклади спостерігалися на території 17 областей. У лютому відклади налипання мокрого снігу категорії НЯ спостерігалися

на території 13 областей, проте найчастіше – на Чернігівщині (17,4 % випадків), Житомирщині та Кіровоградщині (13,0 %), а також на Полтавщині та Дніпропетровщині (8,7 %). На території решти 7 областей повторюваність становила 4,3 %. У березні кількість областей з відкладами ожеледі категорії НЯ становила 11. Здебільшого відклади були поодинокими, проте в Черкаській та Донецькій областях їх було дещо більше – по 2 випадки, що становило 15,4 %. Повторюваність на території решти областей, де вони спостерігалися, становила 7,7 %. У квітні досліджуваного періоду такі відклади спостерігалися поодиноко лише в 4 областях: Львівській, Чернівецькій, Сумській та Дніпропетровській у рівній кількості – по 1 випадку в кожній. У жовтні випадків налипання мокрого снігу категорії НЯ протягом 2021–2025 рр. не спостерігалося. У листопаді збільшилося розповсюдження відкладів налипання мокрого снігу категорії НЯ. Вони траплялися на території 16 областей. Найбільше їх було на Львівщині та Дніпропетровщині – 12,5 %, а також у Чернігівській, Київській та Харківській областях, де повторюваність становила по 9,4 % для кожної області. Повторюваність випадків на території решти областей становила від 3,1 до 6,3 %. У грудні 2021–2025 рр. кількість таких випадків становила 36, вони спостерігалися на території 14 областей, найчастіше на Запоріжжі – 22,2 %, а також на Львівщині – 13,9 %, Хмельниччині та Дніпропетровщині – по 11,1 %. Для решти областей, де спостерігалися такі відклади, повторюваність становила 2,8 та 5,6 %.

2.2. Відклади налипання мокрого снігу категорії СГЯ

Результати проведеного дослідження наведено на рисунках 7 та 8, а також у таблицях 7 та 8. Відкладів налипання мокрого снігу категорії СГЯ протягом 2021–2025 рр. спостерігалося мало і лише в січні, листопаді та грудні – загальною кількістю 5 випадків. У січні 2021 р. такі відклади спостерігалися лише на Одещині, у листопаді 2022 та 2023 рр. – на Кіровоградщині та Дніпропетровщині, а в грудні 2022 та 2023 рр. – на Кіровоградщині та Тернопільщині. Таким чином, здебільшого такі відклади спостерігались у 2022 та 2023 рр., повторюваність становила 40,0 % (табл. 7). У 2024 та 2025 рр. випадків налипання мокрого снігу категорії СГЯ на території взагалі не спостерігалося. У таблиці 8 подано повторюваність таких випадків за окремими місяцями досліджуваного періоду. Встановлено, що випадки відкладів налипання мокрого снігу категорії СГЯ спостерігалися лише в січні, листопаді та грудні, причому у двох останніх частіше (40,0 %). Отже, можна сказати, що найбільш вірогідними місяцями, протягом яких спостерігалися такі відклади,

є здебільшого зимові місяці та передзим'я. Найчастіше випадки відклади мокрого снігу спостерігалися в центральному регіоні – на Кіровоградщині (рис. 6).

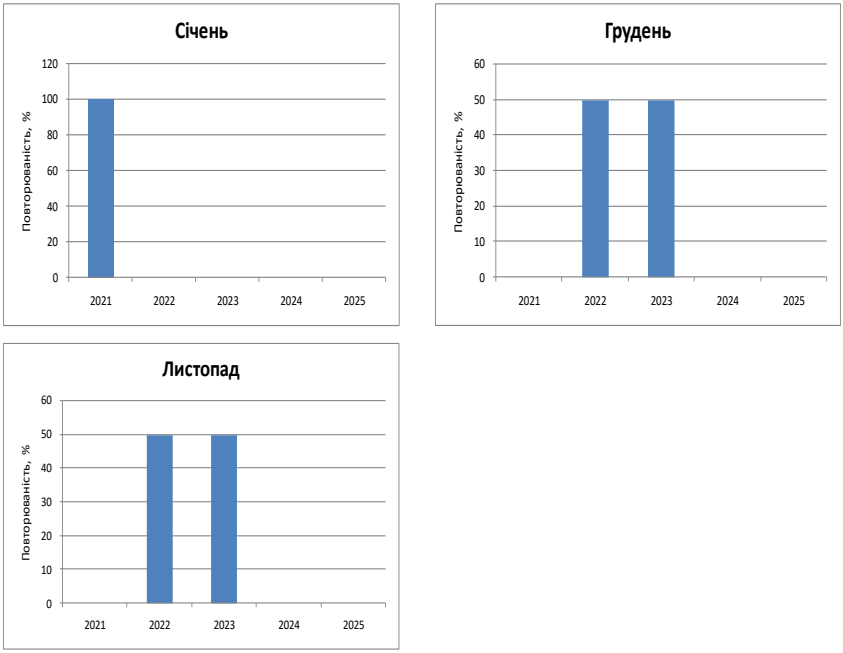


Рис. 7. Повторюваність випадків відкладів налипання мокрого снігу категорії СГЯ за окремими місцями протягом 2021–2025 рр.

Таблиця 7

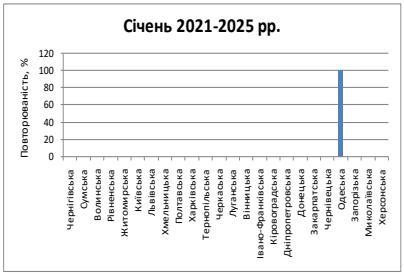
Кількість та повторюваність (%) випадків налипання мокрого снігу категорії СГЯ на території України за окремими роками протягом 2021–2025 рр.

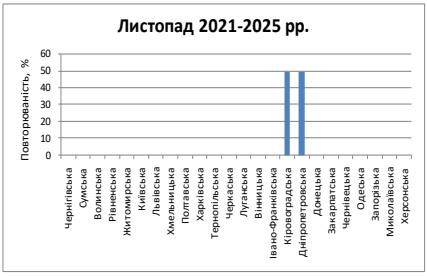
Показник	Роки					Усього
	2021	2022	2023	2024	2025	
Кількість	1	2	2	0	0	5
Повторюваність,%	20,0	40,0	40,0	0,0	0,0	100,0

Таблиця 8

Кількість та повторюваність (%) випадків налипання мокрого снігу категорії СГЯ на території України за окремими місяцями протягом 2021–2025 рр.

Показник	Місяці							Усього
	I	II	III	IV	X	XI	XII	
Кількість	1	0	0	0	0	2	2	5
Повторюваність,%	20,0	0,0	0,0	0,0	0,0	40,0	40,0	100,0





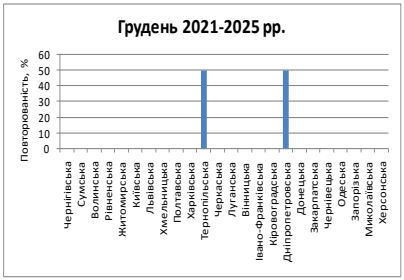


Рис. 8. Повторюваність кількості випадків відкладів налипання мокрого снігу категорії СГЯ в областях протягом 2021–2025 рр.

3. Випадки складних відкладів категорії НЯ (небезпечні) та СГЯ (стихійні)

3.1. Складні відклади категорії НЯ

Одним із видів ожеледо-паморозевих відкладів є відклади, які утворюються в разі поєднання відкладів ожеледі (або мокрого снігу), а також паморозі зернистої або кристалічної. Іноді такі відклади за їх почергового відкладення можуть сягати значних розмірів та спричиняти

різні небезпечні ситуації. Здебільшого вони не так поширені, ніж ожеледь або налипання мокрого снігу. Результати дослідження подано на рисунках 9 та 10, а також у таблицях 9 та 10. Усього випадків складних відкладів категорії НЯ протягом п'ятиріччя було 49. За окремими роками досліджуваного періоду встановлено, що в січні найбільша кількість таких відкладів спостерігалась у 2023 р., що становило 41,7 % від їх кількості протягом п'ятиріччя. У лютому у 2021 р. кількість випадків складних відкладів категорії НЯ було найбільшою, що становило 50,0 % від загальної кількості за цей місяць протягом досліджуваного п'ятиріччя. На 2022 та 2023 рр. припало по 25,0 % таких випадків. У березні кількість таких випадків була незначною – спостерігалося по 1 випадку лише у 2023 та 2025 рр. Наприкінці весни та початку осені складні відклади категорії НЯ не спостерігалися на території України. У листопаді протягом років досліджуваного п'ятиріччя траплялись поодинокі випадки складних відкладів, половина яких спостерігалась у 2022 р. – 50,0 %, а ще половина припала на 2023 та 2024 рр. Збільшення кількості таких відкладів спостерігалось у грудні, особливо у 2021 та 2023 рр., що становило 39,1 % для кожного з цих років. Характерною ознакою цього періоду є те, що в грудні подібні відклади спостерігалися в усіх з досліджуваних років. Загалом за кількістю випадків із такими відкладами виділяються 2021 р. та 2023 р. – повторюваність становить 32,7 та 36,7 % відповідно. Найменша кількість випадків складних відкладів категорії НЯ спостерігалась у 2025 р., що становило 4,1 % (табл. 9). Дослідження кількості випадків складних відкладів за окремими місяцями п'ятиріччя показало, що найбільша їх кількість спостерігається в січні та грудні – 24,5 та 46,9 % відповідно (табл. 10).

Просторово-часове розповсюдження випадків складних відкладів протягом окремих досліджуваних місяців 2021–2025 рр. представлено на рис. 8. Треба зазначити, що такі відклади не завжди спостерігаються лише в одній області, де створюються більш сприятливі умови для їх виникнення, а поширюються і в інших областях. Встановлено, що в січні такі відклади спостерігалися на території 11 областей. Причому найбільше випадків складних відкладів категорії НЯ спостерігалося на території Хмельницької області – повторюваність становила 16,7 %. На території решти областей, де вони спостерігалися, повторюваність становила 8,3 %. У лютому протягом п'ятиріччя (2021–2025 рр.) випадки складних відкладів категорії НЯ спостерігалися на території 4 областей, причому переважно на Закарпатті, де повторюваність становила 62,5 %. На території решти областей повторюваність становила 12,5 %. У березні спостерігався лише один випадок таких відкладів категорії НЯ – на Закарпатті.

У листопаді випадки складних відкладів категорії НЯ також здебільшого спостерігалися на території Закарпаття, що становило 50,0 % від загальної кількості за місяць у п'ятирічний період. У грудні такі відклади були поширені на території 10 областей. Найбільш розповсюдженими вони були на Закарпатті (26,1 %) та на Харківщині (21,7 %). На Львівщині, Чернівеччині та Хмельниччині їх повторюваність становила по 8,7 % для кожної з областей. У решті областей повторюваність становила 4,3 %.

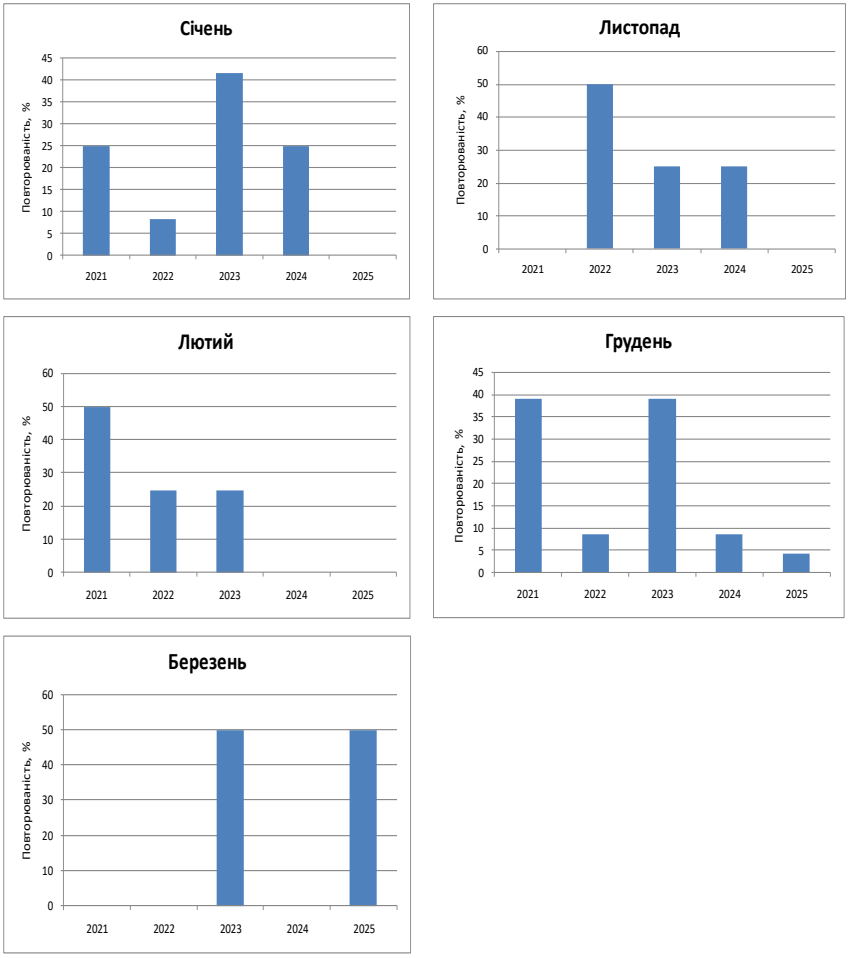


Рис. 9. Повторюваність випадків складних відкладів категорії НЯ за окремими місцями протягом 2021–2025 рр.

Таблиця 9

Кількість та повторюваність (%) випадків складних відкладів категорії НЯ на території України за окремими роками протягом 2021–2025 рр.

Показник	Роки					Усього
	2021	2022	2023	2024	2025	
Кількість	16	7	18	6	2	49
Повторюваність,%	32,7	14,3	36,7	12,2	4,1	100,0

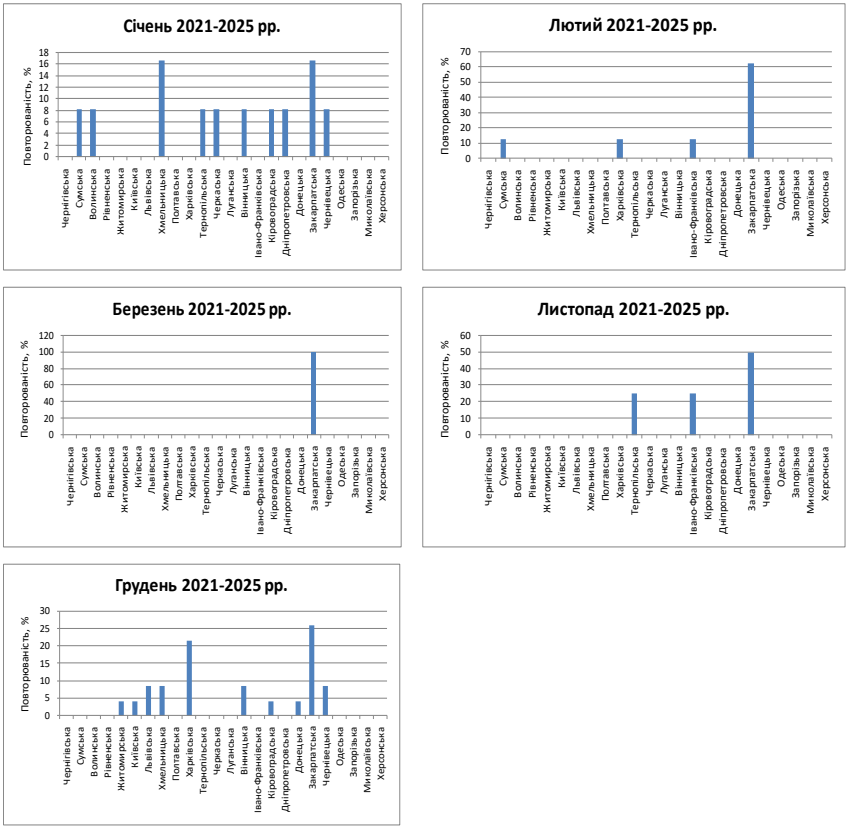


Рис. 10. Повторюваність кількості випадків із складними відкладами категорії НЯ в областях протягом 2021–2025 рр.

Таблиця 10

Кількість та повторюваність (%) випадків складних відкладів категорії НЯ на території України за окремими місяцями протягом 2021–2025 рр.

Показник	Місяці							Усього
	I	II	III	IV	X	XI	XII	
Кількість	12	8	2	0	0	4	23	49
Повторюваність,%	24,5	16,3	4,1	0,0	0,0	8,2	46,9	100,0

3.2. Складні відклади категорії СГЯ

Протягом 2021–2025 рр. на території України поодиноко спостерігалися випадки складних відкладів категорії СГЯ. Результати дослідження представлено на рисунках 11 та 12, а також у таблицях 11 та 12. Загалом таких випадків виявилося 27, що перевищувало кількість аналогічних відкладів тієї ж категорії ожеледі (19) або відкладів налипання мокрого снігу (5). За роками досліджуваного періоду вони розподілялися таким чином: у січні такі відклади було зафіксовано у 2021, 2023, 2024 та 2025 рр., але найбільше – у двох останніх, що становило по 33,3 % для кожного з них. У лютому такі відклади також спостерігалися майже в кожному з років п'ятиріччя, за винятком 2025 р. У 2021 та 2023 рр. їх кількість була більшою і становила 33,3 %. У березні та квітні досліджуваного п'ятиріччя випадки складних відкладів категорії СГЯ були поодинокі. Так, у березні спостерігалося лише 2 випадки таких відкладів – у 2021 та 2025 рр., а у квітні – лише 1 у 2022 р. Наступним місяцем, коли спостерігалися випадки складних відкладів, виявився листопад. Так, такі відклади спостерігалися тільки у 2022 та 2023 рр. Протягом грудня 2021–2025 рр. кількість таких відкладів збільшилася, причому у 2021 р. їх спостерігалось найбільше, що становило 37,5 % (рис. 9). По окремих роках досліджуваного п'ятиріччя найбільша кількість таких випадків спостерігалась у 2021 та 2024 рр., що становило відповідно 21,1 та 42,1 % загалу за п'ятиріччя (табл. 11). Аналізуючи розподіл випадків складних відкладів за окремими місяцями, можна стверджувати, що основний внесок у загальну їх кількість за п'ятиріччя зробили січень, лютий та грудень, що становило по 22,2 % для січня та лютого і 29,6 % для грудня (табл. 12).

Розподіл по території випадків складних відкладів категорії СГЯ характеризувався тим, що переважно вони спостерігалися на Закарпатті в районі Плаю і лише один випадок на Одещині в Любашівці (рис. 10).

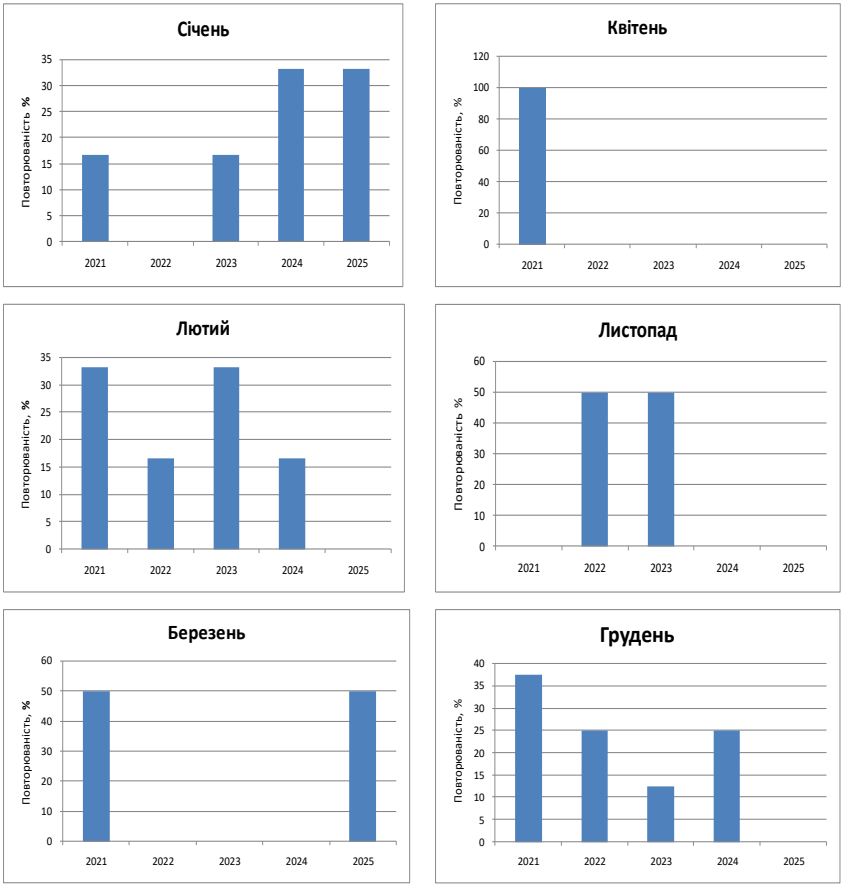


Рис. 11. Повторюваність випадків складних відкладів категорії СГЯ за окремими місцями протягом 2021–2025 рр.

Таблиця 11

Кількість та повторюваність (%) випадків складних відкладів категорії СГЯ на території України за окремими роками протягом 2021–2025 рр.

Показник	Роки					Усього
	2021	2022	2023	2024	2025	
Кількість	8	5	6	5	3	27
Повторюваність,%	29,6	18,5	22,2	18,5	11,1	100,0

Таблиця 12

Кількість та повторюваність (%) випадків складних відкладів категорії СГЯ на території України за окремими місяцями протягом 2021–2025 рр.

Показник	Місяці							Усього
	I	II	III	IV	X	XI	XII	
Кількість	6	6	2	1	0	4	8	27
Повторюваність,%	22,2	22,2	7,4	3,7	0,0	14,8	29,6	100,0

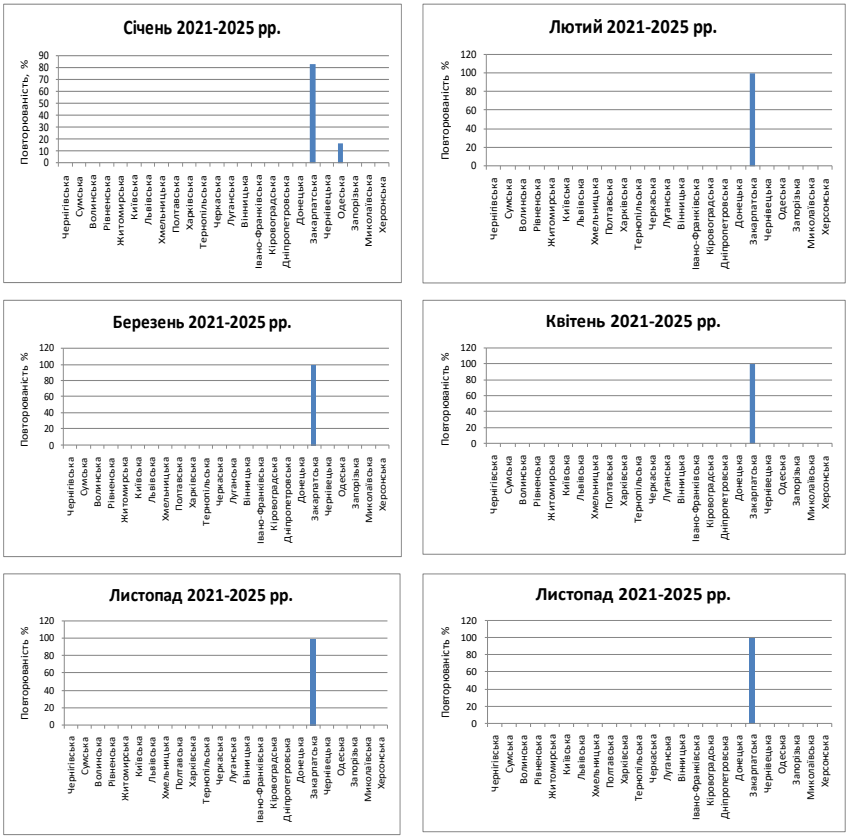


Рис. 12. Повторюваність кількості випадків із складними відкладами категорії СГЯ в областях протягом 2021–2025 рр.

ВИСНОВКИ

Зважаючи на вищевикладене, можна сказати, що протягом 2021–2025 рр. на території України спостерігалася низка випадків ожеледо-паморозевих відкладів, які досягли критеріїв категорії НЯ (небезпечні) та СГЯ (стихійні).

Встановлено, що протягом досліджуваного часу на території України з ожеледо-паморозевих відкладів категорії НЯ переважали відклади ожеледі та налипання мокрого снігу, що становило 104 та 135 випадків відповідно. Кількість випадків складних відкладів становила 49.

Серед ожеледо-паморозевих відкладів категорії СГЯ найбільшу кількість мали відклади ожеледі та складні відклади –19 та 27 випадків відповідно. Відкладів налипання мокрого снігу категорії СГЯ було лише 5.

Доведено, що за кількістю випадків досліджуваних ожеледо-паморозевих відкладів категорії НЯ виділяються 2021, 2022 та 2023 рр., а за окремими місяцями – здебільшого січень і грудень.

За територією розповсюдження відкладів ожеледі категорії НЯ виділяється регіон від північного сходу до південного сходу та центральні області в зимові місяці, а в місяці перехідних сезонів – області Карпатського регіону.

Відклади ожеледі категорії СГЯ найчастіше спостерігались у 2021 та 2024 рр., переважно в січні та лютому. За територією виявлення вони здебільшого спостерігалися в Карпатському регіоні й поодиноко в центрі.

Найбільша кількість випадків налипання мокрого снігу категорії НЯ спостерігалась у 2021, 2023 та 2024 рр. у зимові місяці, такі випадки були широко представлені по території України.

Випадки налипання мокрого снігу категорії СГЯ протягом досліджуваного часу на території України були поодинокими. Найбільше вони спостерігались у 2022 та 2023 рр. у листопаді та грудні. За територією розповсюдження вони здебільшого спостерігалися в центрі країни.

Складні відклади категорії НЯ були менш поширеними, ніж відклади ожеледі та налипання мокрого снігу. Загалом таких випадків було 49. Найбільш часто вони спостерігались у 2021 та 2023 рр. у січні та грудні. Територіально вони були більш поширені на заході країни в Карпатському регіоні, а також у низці областей центру.

На відміну від відкладів ожеледі та налипання мокрого снігу категорії СГЯ, спостерігалася більша кількість випадків складних відкладів цієї ж категорії – 27 випадків. Такі відклади частіше спостерігались у 2021 та 2023 рр. За окремими місяцями досліджуваного періоду частіше такі відклади спостерігалися в січні, лютому та грудні. Територіально такі відклади спостерігалися здебільшого на Закарпатті.

Перспектива подальших досліджень. У подальшому вважається доцільним не тільки продовжити моніторинг прояву небезпечних та стихійних метеорологічних явищ на території України, а й зробити порівняння отриманих результатів із попередніми висновками, які отримано для 30-річних періодів кліматологічних норм 1961–1990 рр., оновлених за рекомендацією ВМО 1981–2010 рр. та 1991–2020 рр.

АНОТАЦІЯ

Статтю присвячено дослідженню й аналізу особливостей просторово-часового розподілу випадків ожеледо-паморозевих відкладів (ожеледь, мокрий сніг, складні відклади), які досягли критерію небезпечних (НЯ) та стихійних (СГЯ) гідрометеорологічних явищ на території України протягом 2021–2025 рр. Матеріалами для аналізу слугували таблиці інструментальних спостережень за ожеледо-паморозевими відкладами на дротах стандартного ожеледного станка. Мета статті – встановити особливості просторово-часового розподілу випадків ожеледо-паморозевих відкладів, які досягнули критерію НЯ та СГЯ на території України протягом останнього п'ятиріччя на поточному етапі зміни клімату.

Проаналізовано розподіл випадків ожеледо-паморозевих відкладів (ожеледі, налипання мокрого снігу та складних відкладів), які досягнули критеріїв НЯ та СГЯ, за окремими місяцями та роками досліджуваного періоду, а також визначено їх просторово-часове розповсюдження. Встановлено, що здебільшого випадки ожеледі категорії НЯ спостерігались у 2021 р., переважно в січні, лютому та грудні. Щодо території, то такі відклади частіше спостерігались в областях від північного сходу до південного сходу, а також подекуди в центрі. У квітні та жовтні вони спостерігалися в Карпатському регіоні. Відклади ожеледі категорії СГЯ здебільшого спостерігались у 2021 та 2024 рр. у січні та грудні, а за територією їх найбільша повторюваність спостерігалася в Карпатському регіоні, хоча окремі з них траплялися в центрі та подекуди на півдні країни. Помічено збільшення загальної кількості випадків налипання мокрого снігу категорії НЯ порівняно з випадками ожеледі. Такі випадки спостерігалися протягом усіх досліджуваних років, але найбільше у 2021, 2023 та 2024 рр. Основний внесок у їх повторюваність за місяцями зробили січень, лютий та грудень. Відклади налипання мокрого снігу були дуже поширені по території України, особливо в центральних, південно-східних та південних областях. Випадки відкладів налипання мокрого снігу категорії СГЯ були поодинокими і спостерігалися лише у 2021, 2022, 2023 рр., причому найбільше – у двох останніх. Найбільша їх кількість відзначалася в листопаді та грудні, а за територією вони здебільшого

спостерігалися в центрі та подекуди на півдні. Загалом кількість складних відкладів категорії НЯ порівняно з іншими видами відкладів була значно меншою. Найбільше їх було у 2021 та 2023 рр., особливо в січні та грудні. Щодо території, то вони частіше зустрічалися в Карпатському регіоні, а подекуди в центрі. Найбільше випадків складних відкладів категорії СГЯ спостерігалося в січні, лютому та грудні. За територією такі випадки здебільшого спостерігалися на Закарпатті.

Література

1. Гребенюк Н. П. Нове про зміни глобального та регіонального клімату в Україні на початку XXI ст. / Н. П. Гребенюк, Т. В. Корж, О. О. Яценко. *Водне господарство України*. 2002. № 5–6. 34 с.

2. Глобальне потепління і клімат України: регіональні екологічні та соціально-економічні аспекти / В. М. Волощук, С. Г. Бойченко, С. М. Степаненко, С. Ю. Бортник, П. Г. Шищенко. Київ : ВПЦ «Київський університет», 2002. 117 с.

3. Керівний документ КД 52.3.2.03-13. Код для передавання штормових оповіщень про фактичні небезпечні та стихійні гідрометеорологічні явища (Код WEREP) Ч. І. Ч. ІІ. Київ, 2013. 45 с.

4. Клімат України / За ред. В. М. Ліпінського, В. А. Дячука, В. М. Бабіченко. Київ : Вид-во Раєвського, 2003. 343 с.

5. Нормативний документ. Настанова з метеорологічного прогнозування. Український гідрометеорологічний центр. Київ, 2019. 36 с.

6. Пясецька С. І., Гребенюк Н. П. Тенденції у зміні середньої місячної температури повітря у місяці теплого сезону протягом 1991–2020 рр. відносно кліматологічної норми 1961–1990 рр. / С. І. Пясецька, Н. П. Гребенюк. *Сталий розвиток: захист навколишнього середовища. Енергоощадність. Збалансоване природокористування : збірник матеріалів VII Міжнародного конгресу* (12–14 жовтня 2022 р. Україна, Львів). С. 26. https://doi.org/10.51500/7826-07-0.

7. Пясецька С. І., Щеглов О. А., Гребенюк Н. П. Порівняння полів середньої місячної температури повітря протягом кліматичних норм 1991–2020 рр. відносно 1961–1990 рр. : колективна монографія / За ред. М. С. Мальованого. Київ : Ярошенко Я. В., 2022. С. 202–228. https://doi.org/10.51500/7826-23-0.

8. Стихійні метеорологічні явища на території України за останнє двадцятиріччя (1986–2005 рр.) / За ред. В. М. Ліпінського, В. І. Осадчого, В. М. Бабіченко. Київ : Ніка-Центр, 2006. 311 с.

9. IPCC 1998 (Intergovernmental Panel of Climate Change). Watson R. T., Zinoyowera M. C., etc. The regional impact of climate change. An assessment of vulnerability. Cambridge : Cambridge Univ. Press, 1998. 517 p.

10. IPCC 2013: Summary for Policymakers. In: Climate Change 2013: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change / T. F. Stocker, D. Qin, G.-K. Plattner, M. Tignor, S. K. Allen, J. Boschung, A. Nauels, Y. Xia, V. Bex, P. M. Midgley (eds.). Cambridge, UK ; New York, USA : Cambridge University Press, 2013. 204 p.

11. IPCC 2014: Synthesis Report. Contribution of Working Groups I, II and III to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change / Core Writing Team, R. K. Pachauri, L. A. Meyer (eds.). Geneva, Switzerland : IPCC, 2014. 163 p.

12. IPCC 2014: Climate Change 2014: Impacts, Adaptation, and Vulnerability. Summary, Frequently Asked Questions, and Cross-Chapter Boxes. Contribution of Working Group II to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change / C. B. Field, V. R. Barros, D. J. Dokken, K. J. Mach, M. D. Mastrandrea, T. E. Bilir, M. Chatterjee, K. L. Ebi, Y. O. Estrada, R. C. Genova, B. Girma, E. S. Kissel, A. N. Levy, S. MacCracken, P. R. Mastrandrea, L. L. White (eds.). Geneva, Switzerland : World Meteorological Organization, 2014. 222 p.

Information about the author:
Pyasetska Svitlana,
Candidate of Geographic Sciences,
Aerologist of the 2nd Category at the Aerology Sector
of the Meteorology Department
Borys Sreznevsky Central Geophysical Observatory
39, Nauky Avenue, Kyiv, Ukraine

04
SECTION

MODERNISATION OF NATURAL SCIENCE EDUCATION: METHODOLOGICAL INNOVATIONS AND PRACTICAL EXPERIENCE

CHAPTER 36

ЗАСТОСУВАННЯ ШТУЧНОГО ІНТЕЛЕКТУ В СИСТЕМІ ПРАКТИЧНИХ ЗАНЯТЬ З ОСВІТНЬОГО КОМПОНЕНТА «НАВЧАЛЬНА ПРИРОДНИЧО-КРАЄЗНАВЧА ПРАКТИКА»

Буднік Світлана
DOI https://doi.org/10.30525/978-9934-26-714-7-36

ВСТУП

Сучасна парадигма вищої педагогічної освіти вимагає постійного оновлення методичного інструментарію. Для здобувачів першого курсу спеціальності А 3 «Початкова освіта» навчальна природничо-краєзнавча практика є одним із ключових етапів формування фахових компетентностей. Вона закладає фундамент для подальшого викладання інтегрованих курсів природничої освітньої галузі («Я досліджую світ», «Я пізнаю світ»). При цьому стрімкий розвиток генеративного штучного інтелекту (ШІ) відкриває нові можливості для оптимізації польових досліджень, краєзнавчих розвідок та оброблення зібраних матеріалів, перетворюючи традиційну практику на високотехнологічний пошуково-дослідницький процес.

Згідно зі схваленою Концепцією розвитку штучного інтелекту в Україні, штучний інтелект – це організована сукупність інформаційних технологій, із застосуванням якої можливо виконувати складні комплексні завдання шляхом використання системи наукових методів дослідження й алгоритмів обробки інформації, отриманої або самостійно створеної під час роботи, а також створювати та використовувати власні бази знань, моделі прийняття рішень, алгоритми роботи з інформацією та визначати способи досягнення поставлених завдань[1].

В українському контексті використання ШІ унормоване низкою документів: розроблено «Дорожню карту з регулювання штучного інтелекту в Україні» (Міністерство цифрової трансформації України);

[1] Доценко С. О., Ворожбіт-Горбатюк В. В., Собченко Т. М., Корнієнко М. Штучний інтелект – асистент сучасного вчителя : навчальний посібник. Харків : Ранок, 2025. 176 с.

надано рекомендації з використання ШІ у школах (МОН України і Міністерство цифрової трансформації України)[2].

1. Наукові підходи до використання штучного інтелекту в сучасній освіті

Стрімкий розвиток технологій штучного інтелекту зумовив суттєве розширення спектра наукових досліджень, присвячених їх використанню в освітній сфері. Сучасні наукові праці висвітлюють теоретичні, методичні та практичні аспекти інтеграції технологій штучного інтелекту в освітній процес, акцентуючи увагу на їхньому потенціалі для персоналізації навчання, розвитку професійних компетентностей здобувачів освіти й педагогів, а також удосконалення цифрового освітнього середовища. Аналіз наукового доробку зарубіжних і українських учених дає змогу визначити основні напрями дослідження цієї проблематики та окреслити перспективи застосування штучного інтелекту в системі практичної підготовки здобувачів освіти. Звертаємо увагу на те, що проблема використання ШІ в освіті активно студіюється у працях як зарубіжних, так і українських науковців. До прикладу, Нейл Селвін вивчає вплив цифрових технологій, включаючи ШІ, на освіту, акцентуючи як на можливостях, так і викликах, які виникають за інтеграції ШІ в навчання, зокрема пов'язані з етичними аспектами, питаннями конфіденційності та нерівності. При цьому вчений пропонує використовувати ШІ для персоналізації навчання і створення інструментів, які підтримуватимуть учителя, а не замінять його.

Вартісним нам видається доробок Розалінди Пікард щодо дослідження ШІ, зокрема, у площині розроблення емоційного ШІ. Суттєво, що роботи дослідниці спрямовані на створення технологій, які допомагають розпізнавати емоції учнів і адаптувати навчання відповідно до їхнього емоційного стану через сенсори для відстеження емоцій людини, адаптивні освітні платформи, які можуть змінювати зміст або темп навчання залежно від рівня залученості учня, як одна з конструктивних пропозицій ученої.

Щодо українських учених, які студіюють різні аспекти використання ШІ в освітньому процесі, а саме: можливості використання ШІ як помічника викладача (І. Візнюк, Н. Буглай, Л. Куцак та ін.); дослідження впливу ШІ на медіаграмотність (С. Терепищий); вплив ШІ на розвиток професійних компетентностей учителя початкових класів (Н. Морзе, Л. Варченко-Троценко, Т. Терлецька, Є. Смирнова-Трибульська); вплив

[2] Доценко С. О., Ворожбіт-Горбатюк В. В., Собченко Т. М., Корнієнко М. Штучний інтелект – асистент сучасного вчителя : навчальний посібник. Харків : Ранок, 2025. 176 с.

ШІ на розвиток професійних компетентностей учителя початкових класів (Д. Гововко, Н. Денисова) та ін.

Посутній інтерес становлять наукові праці, де розглядаються питання застосування штучного інтелекту в початковій школі, інтеграція штучного інтелекту в природничу освітню галузь, роль штучного інтелекту в сучасній освіті, практичні кейси використання ШІ у навчанні та викладанні (С. Доценко, Т. Собченко, В. Ворожбіт-Горбатюк); технологій штучного інтелекту в освітньому процесі початкової школи в контексті реалізації Концепції нової української школи (О. Очеретян та ін.).

Не можемо оминути увагою той факт, що застосування штучного інтелекту безпосередньо у вузькому сегменті «навчально-краєзнавчої» чи «польової» практики можна вважати порівняно інноваційною проблемою, яка лише починає розроблятися в українському науковому просторі, а отже, фундаментальних монографічних досліджень у цьому вимірі ще небагато.

У контексті порушеної проблеми викликають особливе зацікавлення роботи, виконані на перетині кількох суміжних напрямів: використання ШІ в STEM/STEAM-освіті, цифровізація польових практик (географічних, біологічних) та віртуальне краєзнавство.

Тут варто згадати науковців (Н. Морзе[3], С. Литвинова[4], М. Гладун), які досліджують використання смарт-технологій, ШІ та доповненої реальності для ідентифікації природних об'єктів та моніторингу довкілля під час практичної діяльності здобувачів освіти, елементів ШІ в дослідницькому навчанні природничих дисциплін; вивчають інтеграцію цифрових інструментів та розумних застосунків у проєктну та практичну діяльність у межах STEM-освіти (Н. Балик, Г. Шмигер); застосування цифрових технологій (зокрема розумних алгоритмів) у сфері туризму, краєзнавства та створення віртуальних екскурсій (О. Гриценчук, О. Пінчук); висвітлюють питання використання цифрових сервісів та геоінформаційних технологій у громадянській та краєзнавчій освіті, можливості мобільних технологій та ГІС-систем, які працюють на базі алгоритмів машинного навчання, під час польових практик та екологічного моніторингу (В. Ткачук, А. Стрюк); досліджують теоретико-методичні засади використання хмарних орієнтованих систем

[3] Морзе Н. В., Бойко М. А. Цифрова компетентність учителя в еру штучного інтелекту : навчальний посібник. Київ : Київський столичний університет імені Бориса Грінченка, 2025. 252 с.

[4] Литвинова С. Г. Методичні підходи та дидактичні моделі використання мобільного навчання в умовах криз та розвитку штучного інтелекту. *Науковий вісник Ужгородського університету. Серія «Педагогіка. Соціальна робота»*. 2026. № 58. С. 162–170. DOI: https://doi.org/10.24144/2524-0609.2026.58.162-170

відкритої науки та ШІ в освітньому процесі закладів вищої освіти (В. Биков, О. Спірін, М. Мар'єнко та ін.).

Отже, резюмуючи, можна стверджувати, що проблема застосування штучного інтелекту в системі практичних занять з освітнього компонента «Навчальна природничо-краєзнавча практика» досліджена недостатньо, що й зумовило вибір теми дослідження.

2. Штучний інтелект як засіб модернізації освітньої компоненти «Навчальна природничо-краєзнавча практика»

Навчальна природничо-краєзнавча практика є невід'ємним складником фахової підготовки майбутніх учителів початкових класів, яка забезпечує безпосередній контакт здобувачів із природним середовищем рідного краю. У контексті сучасної освітньої парадигми ця практика виходить за межі традиційного пасивного спостереження, вимагаючи впровадження інноваційних STEM/STEAM/STREAM-підходів, де природничі науки (Science) тісно інтегруються з технологіями (Technology). Саме інтеграція штучного інтелекту (ШІ) дає змогу трансформувати польові та камеральні етапи практики, перетворюючи рутинні завдання на захопливий пошуково-дослідницький процес.

Варто зазначити, що практичні заняття з краєзнавства традиційно поділяються на польовий та камеральний етапи. На етапі польових досліджень ключовими завданнями студентів є вивчення локальних екосистем, розпізнавання видів рослин і тварин, а також фіксація екологічного стану біотопів (наприклад, під час вивчення гідробіоценозів чи лісових масивів Волинського регіону). Тривалий час ідентифікація знайдених зразків вимагала роботи з громіздкими паперовими визначниками, що ускладнювало процес вивчення безпосередньо в польових умовах.

Застосування технологій комп'ютерного зору (Computer Vision), що є галуззю ШІ, кардинально змінює цю ситуацію. Використання мобільних застосунків, таких як iNaturalist, PlantNet чи Seek (на базі технологій розпізнавання образів), дає змогу здобувачам миттєво ідентифікувати представників місцевої флори та фауни через камеру смартфона. Це не лише пришвидшує процес інвентаризації біорізноманіття під час вивчення природи рідного краю, а й залучає студентів до глобальної мережі citizen science (громадянської науки), де їхні спостереження верифікуються науковою спільнотою, доповнюючи світові бази даних.

Система практичних занять із природничо-краєзнавчої практики традиційно включає:

- польові дослідження та розпізнавання біологічних об'єктів;

● екскурсії, роботу з гербарним і колекційним матеріалом;

● рефлексію, проєктування дидактичних засобів для початкової школи. Упровадження ШІ на кожному із цих етапів дає змогу суттєво розширити пізнавальні можливості здобувачів освіти.

1. ***ШІ у польових дослідженнях та розпізнаванні біологічних об'єктів***. Під час екскурсій у природу (наприклад, під час дослідження біорізноманіття лісових екосистем, водойм або територій національних природних парків, зокрема таких, як Національний природний парк «Прип'ять-Стохід») першокурсники наражаються на проблему швидкої та точної ідентифікації видів рослин і тварин. Використання при цьому мобільних застосунків на базі комп'ютерного зору та ШІ (iNaturalist, PlantNet, Merlin Bird ID) дає змогу здобувачам вищої освіти:

- миттєво ідентифікувати представників місцевої флори та фауни за фотографією чи звуком;
- отримувати розгорнуті довідкові дані про ареал поширення, екологічні особливості та охоронний статус видів;
- формувати цифрові бази даних локального біорізноманіття для подальшого створення дидактичних карток.

Суттєво допомагає першокурсникам розпізнавати біологічні об’єкти теоретична інформація щодо діджиталізації краєзнавства у початковій школі, а саме:

1. QR-коди: «Портали» у світ інформації.

QR-код – це найпростіший інструмент доповненої реальності. У початковій школі вони допомагають уникнути перевантаження дітей текстом.

Як це працює у краєзнавстві: під час екскурсії біля пам'ятки чи дерева ви розміщуєте код. Дитина сканує його й отримує не нудну довідку, а аудіозапис «голосу» пам’ятника, короткий мультфільм про цю локацію, пазл або вікторину, яку треба розв’язати на місці.

Інструменти для вчителя: *QR Code Generator*, *Canva*.

Методична порада: робіть QR-коди кольоровими або з картинками всередині: діти охочіше реагують на візуально привабливі об'єкти.

2. Google Maps: більше ніж просто навігація.

Картице – фундамент просторового мислення. У початковій школі ми переходимо від абстрактного малюнка до реальної супутникової карти.

Варіанти використання:

1. Створення власних карт: разом із класом можна створити «Карту легенд нашого міста» або «Зелену мапу району», де учні самі позначатимуть точки.

2. Street View (перегляд вулиць): якщо немає можливості поїхати в сусіднє село до музею, ми йдемо туди віртуально. Це допомагає дітям порівнювати: «Як цей будинок виглядає зараз і як він міг виглядати 100 років тому?».

3. Вимірювання відстаней: просте завдання – порахувати, скільки метрів від школи до найближчого парку, – розвиває математичні навички в контексті реального життя.

3. Застосунки для «оживлення» природи та історії.

Молодші школярі за своєю природою є дослідниками. Діджитал-інструменти стають їхньою «лупою» або «машиною часу».

Google Lens: незамінний для природничого краєзнавства. Бачимо невідому квітку чи дерево – фотографуємо, отримуємо назву та опис. Це вчить дітей самостійно шукати відповіді.

Seek (від iNaturalist): гейміфікований додаток для розпізнавання флори та фауни. За кожну знайдену рослину дитина отримує «значки», що ідеально працює на мотивацію в 1–4-му класах.

Travel Guide-додатки: наприклад, додатки з AR (доповненою реальністю), які показують, як виглядали зруйновані будівлі раніше.

Методичний конструктор: Як організувати заняття?

Щоб діджиталізація не стала хаосом, використовуйте таку структуру:

Етап	Діяльність учнів	Інструмент
Підготовка	Вивчення маршруту на екрані	Google Earth
Експедиція	Пошук «скарбів» за QR-кодами	Сканер QR / Камера
Дослідження	Визначення рослин чи птахів	Google Lens / Seek
Рефлексія	Створення фотозвіту або мітки на карті	Google Maps / Padlet

Чому це важливо для НУШ?

Ми формуємо цифрову компетентність паралельно з громадянською та соціальною. Дитина не просто споживає контент, вона вчиться використовувати телефон як інструмент для пізнання своєї Батьківщини. Це перетворює локальну історію з «параграфів у підручнику» на живий, динамічний світ.

2. ***Генерація краєзнавчого контенту та віртуальних екскурсій***. Освітній компонент передбачає ознайомлення здобувачів вищої освіти з геологічною історією, корисними копалинами (наприклад, волинським бурштином) та палеонтологічними знахідками рідного краю. Наприклад, виконання практичної роботи, пов'язаної з розробленням віртуальної палеонтологічної екскурсії з використанням цифрових інструментів та ШІ.

Мета: сформувати навички проєктування інтерактивних освітніх маршрутів; навчитися застосовувати штучний інтелект для пошуку палеонтологічних даних та візуалізації доісторичного минулого; розвинути вміння адаптувати складний природничий матеріал для сприйняття здобувачами освіти початкової школи, інтегруючи STREAM-підхід.

Обладнання та матеріали: ПК або планшети з доступом до мережі Інтернет, сервіси цифрової картографії (Google Earth, Google Maps), платформи для створення інтерактивних презентацій (Genially, Canva, Google Презентації), доступ до інструментів генеративного штучного інтелекту.

Хід роботи

Етап 1. Вибір краєзнавчої локації та тематики.

1. Виберіть конкретний геологічний період або об'єкт вашої місцевості для віртуального дослідження.

2. Орієнтовні ідеї для маршруту: «Таємниці сонячного каменю» (історія формування бурштинових покладів, вивчення інклюзій як вікна у субтропічні ліси минулого), «Слідами льодовикового періоду» (реконструкція мамонтової фауни), «Давні моря нашого краю» (пошук скам'янілостей, молюсків, белемнітів).

Етап 2. Пошуково-дослідницька робота (робота зі ШІ та джерелами).

1. Використайте ШІ-асистентів для збору цікавих палеонтологічних фактів про вибрану епоху. Сформулюйте запити (промпти) для отримання інформації про клімат, флору та фауну того часу.

2. Проведіть обов'язкову верифікацію (перевірку) згенерованих даних за допомогою фахових наукових чи музейних джерел, щоб уникнути фактологічних помилок.

Етап 3. Картографування та візуалізація.

1. Створіть маршрут у Google Earth або на Google Maps. Позначте 3–5 «віртуальних зупинок» (наприклад, реальні місця палеонтологічних знахідок, кар'єри, береги річок).

2. За допомогою нейромереж згенеруйте ілюстрації, які б показували, як виглядала кожна конкретна зупинка мільйони років тому. Порівняйте сучасний ландшафт із доісторичним.

Етап 4. Сценарій та дидактична адаптація (STREAM-компонент).

1. Розробіть текст екскурсії. Особливу увагу приділіть сторітелінгу (розповіді історій), щоб утримати увагу здобувачів освіти.

2. Додайте інтерактивні STREAM-завдання для кожної зупинки:

Science (Наука). Порівняти будову сучасного мечохвоста або комахи з їхнім викопним предком (з інклюзії).

Technology (Технології). Зібрати віртуальний пазл зі скелетом давньої тварини.

Engineering/Art (Інженерія/Мистецтво). Запропонувати дітям після екскурсії зробити відбиток скам'янілості з солоного тіста або гіпсу.

Mathematics (Математика). Завдання на порівняння розмірів (наприклад, обчислити, у скільки разів давній хижак був більший за сучасного кота, використовуючи інфографіку).

Етап 5. Оформлення результатів.

1. Зберіть усі створені матеріали, карти, згенеровані зображення та завдання на обраній платформі (наприклад, у Genially у вигляді інтерактивної карти, де на кожній точці відкривається нове вікно).

2. Продумайте аудіосупровід (звуки природи, джунглів, води) для більшого занурення.

Зауважимо, за допомогою великих мовних моделей (LLM) та генераторів зображень студенти можуть розробляти інтерактивні віртуальні тури краєзнавчими музеями для майбутніх учнів. ШІ допомагає: адаптувати складні наукові (палеонтологічні, геологічні) тексти для сприйняття дітьми молодшого шкільного віку; генерувати сценарії краєзнавчих квестів; створювати візуалізації вимерлих тварин або історичних ландшафтів рідного краю на основі текстових описів; проводити віртуальні палеонтологічні екскурсії, наприклад на тему «Таємниці бурштинового лісу».

Формат. Інтерактивна презентація (Genially, Canva або Google Earth) з анімованими переходами між локаціями.

Мета. Ознайомити майбутніх учителів початкових класів з історією утворення бурштину та доісторичною фауною через інклюзії; розвивати дослідницькі навички за допомогою STREAM-завдань.

3. ***Моделювання екосистем та STREAM-проєктування***. Природничо-краєзнавча практика є чудовим підґрунтям для реалізації STREAM-освіти (Science, Technology, Reading/Writing, Engineering, Arts, Mathematics). На практичних заняттях здобувачі вищої освіти можуть використовувати ШІ як асистента для проєктування екосистемних моделей. Яскравим прикладом є завдання з розроблення концепції біотопного акваріума, який відтворює конкретну місцеву водойму. ШІ-інструменти дають змогу: здійснити швидкий аналіз гідрохімічних параметрів та видового складу вибраного краєзнавчого біотопу; спроєктувати інженерний (Engineering) та математичний (Mathematics) складники життєзабезпечення акваріума; згенерувати ескізи (Arts) майбутнього дидактичного об'єкта, який слугуватиме куточком живої природи в класі.

4. ***Рефлексія та створення дидактичних матеріалів.*** На завершальному етапі практики студенти-першокурсники систематизують зібраний матеріал. Залучення ШІ дає змогу автоматизувати рутинні процеси

оформлення звітів та зосередитися на творчому складнику: створенні робочих зошитів, інтерактивних презентацій, чек-листів спостережень за природою, адаптованих до вимог Нової української школи (НУШ).

Навчальна природничо-краєзнавча практика для здобувачів освіти спеціальності «Початкова освіта» освітнього ступеня «бакалавр», згідно із силабусом, передбачає забезпечення майбутніх учителів необхідним обсягом фахових компетенцій, що дасть змогу компетентно викладати природознавчий складник інтегрованого курсу «Я досліджую світ» у початкових класах відповідно до сучасних вимог, а також підготувати їх до свідомої природоохоронної діяльності через здійснення екологічного виховання молодших школярів.

Мета навчальної природничо-краєзнавчої практики – закріпити теоретичні знання здобувачів освіти, одержані під час аудиторної роботи з ОК «Основи природознавства» з таких модулів, як «Основи землезнавства» та «Біологія рослин», «Біологія тварин», що викладаються для здобувачів освіти І курсу спеціальності «Початкова освіта».

3. Методика організації навчальної природничо-краєзнавчої практики із застосуванням технологій штучного інтелекту

Організація навчальної природничо-краєзнавчої практики у сучасних умовах потребує упровадження інноваційних цифрових технологій, здатних підвищити ефективність практичної підготовки майбутніх учителів початкових класів. Використання технологій штучного інтелекту на всіх етапах практики сприяє активізації дослідницької діяльності здобувачів освіти, розширенню їхніх професійних компетентностей та забезпечує інтеграцію традиційних природничих досліджень із сучасними цифровими інструментами. Основні завдання навчальної природничо-краєзнавчої практики:

«Основи природознавства: нежива природа»:

1. Навчити здобувачів освіти орієнтуватись у просторі за небесними тілами (Сонцем, Місяцем, Полярною зорею), місцевими ознаками та компасом.

2. У польових умовах та під час екскурсій до Волинського краєзнавчого музею ознайомити майбутніх учителів із геологічною будовою та рельєфом території, сучасними геологічними і геоморфологічними процесами, мінералами та гірськими породами, а також гірськими породами свого краю, розглянути взаємозв'язки рельєфу з видами господарської діяльності.

3. Навчити здобувачів освіти проводити основні метеорологічні спостереження, проводити первинну обробку матеріалів метеорологічних спостережень; ознайомити здобувачів освіти з основними

метеорологічними приладами під час екскурсії у Волинський обласний центр із гідрометеорології.

4. Сформувати навички дослідження водних об'єктів; ознайомити з проблемами водопостачання у населених пунктах під час екскурсії до Комунального підприємства «Водоінформаційний центр», спеціалізований Водний центр у Луцьку.

«Основи природознавства: жива природа»:

1. Ознайомити здобувачів освіти з різноманітністю рослин і тварин у природі у цілому та Волинській області зокрема.

2. На конкретних прикладах розкрити взаємозв'язки між живими організмами та навколишнім середовищем.

3. Продемонструвати значення представників живої природи у природі та житті людини й довести необхідність раціонального їх використання та охорони.

4. Довести важливість одержаних із навчальної природничо-краєзнавчої практики знань та сформованих умінь для проведення екскурсій у природу з молодшими школярами під час власної педагогічної діяльності для формування у здобувачів початкової освіти екологічної культури та біотичних світоглядних позицій.

5. Забезпечити оволодіння здобувачами освіти практикою визначення основних видів представників рослинного і тваринного світу та сформувати навички гербаризації рослин і створення колекцій (плодів і насіння, безхребетних) [5].

Звертаємо увагу на те, що навчальна природничо-краєзнавча практика передбачає три етапи: підготовчий, екскурсійний (польовий), післяекскурсійний (камеральний).

На *підготовчому етапі* для здобувачів освіти проводиться настановча конференція, у ході якої вони знайомляться з метою навчальної природничо-краєзнавчої практики, її завданнями, методикою проведення, особливостями збору об’єктів живої та неживої природи та їх гербаризації і виготовлення колекцій, особливостями фіксації одержаних результатів, екскурсійним обладнанням, технікою безпеки.

У *екскурсійний (польовий) період* зі здобувачами освіти проводяться екскурсії у Волинський краєзнавчий музей, Волинський обласний еколого-натуралістичний центр, КП «Водоінформаційний центр» м. Луцьк, спеціалізований Водний центр м. Луцьк, Центральний парк культури та відпочинку імені Лесі Українки, Комунальне підприємство «Луцький

[5] Буднік С. В., Потапчук В. Д. Пошуково-дослідницька робота з палеонтологічного краєзнавства : навчально-методичний посібник. Луцьк, 2024. 160 с.

зоопарк», Волинський обласний центр із гідрометеорології, Заказник «Воротнів» – маленька Швейцарія Волині, ДП «Волинський лісовий селекційно-насіннєвий центр».

Упродовж *післяекскурсійного (камерального) періоду* відбувається завершення комплексних польових досліджень. Зокрема:

– проводиться опрацювання зібраних матеріалів і виконання за ними схем і розрізів, інших графічних робіт, складання таблиць, колекцій гірських порід;

– завершується гербаризація рослин, їх визначення, виготовлення гербарних зразків;

– виготовлення колекцій із зібраних безхребетних тварин.

Усі колекції та гербарні зразки після захисту їх на заліку (за окремими винятками) повертаються здобувачам освіти для подальшого використання їх під час педагогічної практики у школі.

Зміст діяльності здобувачів освіти-практикантів включає такі види роботи:

І. Модуль «Основи землезнавства» (нежива природа).

– проведення екскурсії у Волинський краєзнавчий музей (відділ землезнавства);

– маршрутні дослідження вибраної території;

– вивчення зовнішнього вигляду, будови, походження, віку й особливостей поширення окремих форм і типів рельєфу;

– вимірювання за допомогою приладів таких метеорологічних величин: атмосферного тиску, температури і вологості повітря, швидкості та напрямку вітру, атмосферних опадів;

– проведення візуальних спостережень за хмарністю, горизонтальною видимістю, атмосферними явищами та змінами погоди під час спостережень;

– оброблення результатів метеорологічних спостережень;

– вивчення водних об'єктів, гідрологічні спостереження на річках, озерах, водосховищах (за можливості промірні роботи, вимірювання швидкостей течії), вивчення боліт і підземних вод;

– опис морфології ґрунту за загальноприйнятою схемою.

ІІ. Модуль «Біологія рослин та тварин» (жива природа).

– вивчення експонатів у Волинському краєзнавчому музеї, Волинському обласному еколого-натуралістичному центрі з метою ознайомлення з різноманітністю рослин та грибів України, Волинської області тощо;

– ознайомлення з флористичним складом різних природних зон (Полісся, Карпати тощо) та фітоценозом угруповань (луки, водойма, болото, степ, ліс, поле);

– вивчення рослин, занесених до Червоної книги України, їх зарисовка чи фотографування;

– закріплення знань із розділу «Морфологія рослин» шляхом огляду музейних експонатів, зібраних в Україні та інших країнах світу;

– фіксація екскурсійної розповіді науково-педагогічного працівника в музеї щодо практичного значення рослин (лікарського, промислового, естетичного, харчового), центрів походження культурних рослин та встановлення зв'язку цього матеріалу з відповідними темами ОК «Основи природознавства»;

– вивчення у природі фітоценозів Волинської області, фіксація розповіді науково-педагогічного працівника для подальшого визначення рослин самостійно;

– збір екскурсійного матеріалу, визначення рослин за допомогою науково-педагогічного працівника;

– вивчення маршрутних об'єктів з усвідомленням можливості їх використання для екологічного виховання молодших школярів;

– проведення екскурсії у Волинський краєзнавчий музей (відділ зоології), Луцький зоопарк;

– збір матеріалу в природі та виготовлення ватних зборів у період травневих свят та вихідних окремими мікрогрупами;

– визначення зібраних тварин за допомогою науково-педагогічного працівника;

– ознайомлення з правилами поведінки у природі, пропедевтичне вивчення методики проведення екскурсій зі школярами у природу.

Для унаочнення прикладного аспекту підготовки майбутнього вчителя початкових класів до використання дослідницьких проєктів із палеонтологічного краєзнавства у професійній діяльності проілюструємо конкретними прикладами[6].

Хочемо запропонувати приклад цікавого, на нашу думку, практичного заняття (семінару) на тему «Використання штучного інтелекту для дослідження місцевих палеонтологічних знахідок та їх інтеграція у початкову освіту».

Мета. Сформувати у майбутніх учителів початкових класів навички застосування ШІ для збору, аналізу та візуалізації даних про палеонтологічне минуле рідного краю (на прикладі крейдових відкладень та бурштину), а також навчити адаптувати цей матеріал для молодших школярів.

[6] Пріма Р. М., Буднік С.В. Підготовка вчителя початкової школи до використання дослідницьких проєктів із палеонтологічного краєзнавства у професійній діяльності: прикладний аспект. *Актуальні питання у сучасній науці*. 2025. № 7(37). С. 1125–1134.

Тривалість: 1 пара (80–90 хв).

Обладнання: ноутбуки або смартфони з доступом до Інтернету, доступ до чат-ботів (Gemini, ChatGPT) та генераторів зображень, зразки або якісні макрофотографії місцевого бурштину з інклюзіями чи скам'янілостей.

Структура заняття

І. Вступна частина та мотивація (10 хв).

Проблемне питання. Як розповісти сучасним дітям про те, що мільйони років тому на місці нашого регіону було тепле море або доісторичний ліс, так, щоб це було наочно і захопливо?

Огляд інструментів. Коротке знайомство з можливостями великих мовних моделей (як-от Gemini) для аналізу текстів та генеративних ШІ для створення візуального контенту.

Правило «ШІ-етики». Наголосити студентам на важливості фактчекінгу (перевірки даних ШІ за науковими джерелами), адже нейромережі іноді можуть «галюцинувати» і вигадувати неіснуючі види динозаврів на Волині.

ІІ. Покрокове дослідження за допомогою ШІ (30 хв).

Студенти об'єднуються у мінігрупи (по 2–3 особи). Кожна група отримує своє завдання (наприклад, група 1 – крейдові відкладення, група 2 – флора та фауна «бурштинового» лісу).

Крок 1. Збір наукових даних (Проміпт-інжиніринг) Студенти вчаться формулювати правильні запити (промпти).

Приклад запиту: дій як палеонтолог-дослідник. Надай стислу, але науково достовірну довідку про те, які види організмів найчастіше знаходять у вигляді інклюзій у місцевому бурштині. Наведи 3–4 конкретні приклади комах або рослин.

Крок 2. Аналіз та візуалізація знахідок. Студенти використовують ШІ, який може аналізувати зображення (або описують текстом для генерації).

Практика: Студенти завантажують у ШІ фотографію шматочка бурштину з комахою усередині або крейдового молюска.

Приклад запиту до фото. Проаналізуй це зображення. До якого ряду чи родини може належати ця комаха в бурштині? Які її анатомічні особливості збереглися найкраще?

ІІІ. Педагогічна адаптація матеріалу (25 хв).

Це ключовий етап для майбутніх учителів початкових класів – перетворення складної науки на цікавий урок чи елемент STREAM-проєкту.

Крок 3. Створення дидактичного сторітелінгу.

Приклад запиту: адаптуй зібрану нами інформацію про еоценовий ліс для учнів 3-го класу. Напиши коротку інтерактивну казку від імені

маленької мурашки, яка потрапила у смолу доісторичної сосни, і поясни дітям процес утворення бурштину.

Крок 4. Розроблення практичних завдань (гейміфікація). Студенти просять ШІ згенерувати ідеї для активностей.

Приклад запиту: запропонуй три ідеї для дослідів або творчих робіт (у стилі STEAM) для першокласників на тему «Скам'янілості нашого краю», використовуючи доступні матеріали (глину, епоксидну смолу, желатин тощо).

IV. Презентація результатів та рефлексія (15–20 хв).

Пітчинг: кожна група презентує свій міні проєкт: зачитує згенеровану та відредаговану казку, показує згенеровані чи проаналізовані зображення та пропонує одну STEAM-активність для дітей.

Обговорення. Що ШІ зробив добре, а де довелося виправляти його логіку?

Як ці інструменти економлять час учителя під час підготовки до уроків «Я досліджую світ»?

Зазвичай практичне заняття з освітнього компонента «Навчальна природничо-краєзнавча практика» ми проводимо в інтерактивній формі, передбачаючи наявність таких структурних компонентів:

а) мотивація – фокусування уваги здобувачів освіти на проблемі заняття, стимулювання інтересу до обговорюваної теми (не більше 5% часу);

б) оголошення, представлення теми та очікуваних навчальних результатів – забезпечення розуміння здобувачами освіти змісту їхньої діяльності, тобто чого вони повинні досягти в кінцевому результаті і чого від них чекає викладач (не більше 5% часу);

в) надання майбутнім учителям короткої інформації за мінімально короткий час для того, щоб на її основі виконувати практичні завдання шляхом інтерактивної взаємодії (10–15% часу);

г) інтерактивні вправи – центральна частина заняття, що передбачає застосування керівником практики 1–3 інтерактивних технологій, що відбираються залежно від очікуваних результатів (45–60% часу);

ґ) підбиття підсумків, оцінювання результатів – процес, зворотний інструктажу, рефлексія. Його завдання – прояснити зміст опрацьованого; співвіднести реальні результати з очікуваними; проаналізувати, чому відбулося так, а не інакше; зробити висновки; закріпити чи відкоригувати засвоєння; установити зв’язок між тим, що вже відомо, і тим, що знадобиться засвоїти, навчитись у майбутньому; скласти план подальших дій (до 20% часу) (структуру інтерактивного заняття подано в табл. 1).

Таблиця 1

Структура інтерактивного практичного заняття з освітнього компонента «Навчальна природничо-краєзнавча практика» з використанням штучного інтелекту

<table>
<tr><td colspan="4">Мотивація навчання</td></tr>
<tr><td colspan="2">Завдання</td><td colspan="2">Методи, які можна застосовувати</td></tr>
<tr><td colspan="2">Сфокусувати увагу здобувачів освіти на проблемі</td><td colspan="2"></td></tr>
<tr><td colspan="2">Зацікавити темою, яка вивчається з природничого краєзнавства</td><td colspan="2">Розповідь керівника практики, бесіда, демонстрування, «вилучи зайве», «мікрофон», «злови помилку» тощо</td></tr>
<tr><td colspan="2">Налаштувати на ефективний процес пізнання</td><td colspan="2">Викликати у здобувачів освіти особистісну зацікавленість</td></tr>
<tr><td colspan="4">Оголошення теми та очікуваних результатів практичного заняття</td></tr>
<tr><td colspan="2">Завдання</td><td colspan="2">Прийоми, які можна застосовувати</td></tr>
<tr><td colspan="2">Забезпечити розуміння здобувачів освіти змісту їхньої діяльності, чого вони мають досягти на занятті і чого від них очікує керівник практики</td><td colspan="2">«Дешифрувальник», «морський бій», «мікрофон» тощо.</td></tr>
<tr><td colspan="2">Висвітлити результати діяльності здобувачів освіти на занятті: «Після цього заняття ви зможете…»</td><td colspan="2"></td></tr>
<tr><td colspan="4">Повідомлення навчальної інформації</td></tr>
<tr><td colspan="4">Методи, які можна застосовувати</td></tr>
<tr><td colspan="4">Розминка, «мозковий штурм», «тренування», проблемне навчання, змагання, конкурс, вікторина</td></tr>
<tr><td colspan="4">Інтерактивні вправи</td></tr>
<tr><td colspan="2">Розминка, «перекинь м’яч»</td><td colspan="2">«Так і ні болгарською», навчаючи-навчаюсь («броунівський рух»)</td></tr>
<tr><td>Ланцюжок</td><td>Реклама віртуальних та реальних екскурсій, експедицій</td><td>«Два-чотири-усі разом»</td><td>«Морський бій»</td></tr>
<tr><td>Гронування (асоціації)</td><td>«Дзеркало»</td><td>«Світлофор»</td><td>«Мозковий штурм»</td></tr>
<tr><td>Незакінчені речення</td><td>Творчий звіт (презентація) у Canva Magic Design</td><td>Віртуальна подорож у Львівівський, Київський океанаріуми</td><td>Конкурс «Юні краєзнавці Волині»</td></tr>
<tr><td>«Коло ідей»</td><td>«Крісло автора»</td><td>«Капелюх мудрих висловів»</td><td>Змагання</td></tr>
<tr><td>«Усміхніться»</td><td>«Три рухи»</td><td>«Найкраще я вмію…»</td><td>«Мікрофон»</td></tr>
<tr><td colspan="4">Оцінювання результатів практичного заняття</td></tr>
<tr><td colspan="4">Що ми робили?
Для чого ми це робили?
Досягли поставленої мети?
Що сподобалося, а що ні протягом заняття? Самооцінка, взаємооцінка діяльності учнів.
Анкетування.
«Мікрофон»</td></tr>
</table>

ВИСНОВКИ

Навчальна природничо-краєзнавча практика є важливим компонентом професійної підготовки майбутніх учителів початкових класів, оскільки забезпечує поєднання теоретичних знань із безпосередньою дослідницькою діяльністю в природному середовищі. Її організація охоплює підготовчий, польовий і камеральний етапи, кожен із яких створює умови для формування природничої, дослідницької, цифрової та методичної компетентностей здобувачів освіти. Застосування технологій штучного інтелекту суттєво розширює можливості традиційної практики. Мобільні застосунки на основі комп'ютерного зору сприяють оперативному розпізнаванню природних об'єктів, систематизації спостережень і створенню цифрових баз даних. Генеративні моделі можуть бути використані для аналізу інформації, візуалізації результатів, розроблення дидактичних матеріалів, інтерактивних завдань, навчальних історій і STREAM-проєктів для молодших школярів. Водночас робота з такими інструментами потребує обов'язкового фактчекінгу, оцінювання результатів і дотримання принципів академічної доброчесності. Запропонована методика проведення практичних занять із використанням ШІ забезпечує активну участь здобувачів у пошуковій, проєктній та рефлексивній діяльності. Її реалізація сприяє підвищенню мотивації, розвитку цифрової грамотності, умінь працювати з природничими даними та адаптувати складний науковий матеріал до потреб початкової школи. Отже, інтеграція штучного інтелекту модернізує зміст природничо-краєзнавчої практики та підвищує якість професійної підготовки майбутніх учителів.

АНОТАЦІЯ

У статті розглядається актуальна проблема інтеграції технологій штучного інтелекту (ШІ) в освітній процес, зокрема під час проведення практичних занять з освітнього компонента «Навчальна природничо-краєзнавча практика». Обґрунтовано доцільність інтеграції технологій штучного інтелекту (ШІ) в систему практичних занять освітнього компонента «Навчальна природничо-краєзнавча практика» для здобувачів вищої освіти першого курсу спеціальності А3 «Початкова освіта». Засвідчено, що інтеграція ШІ в систему практичних занять сприяє формуванню цифрової та природничої компетентностей здобувачів освіти, а також ефективній реалізації STEAM/STREAM-підходів у початковій школі. Автором проаналізовано специфіку застосування різноманітних інструментів ШІ (застосунків для ідентифікації флори та

фауни на базі комп'ютерного зору, генеративних мовних моделей для аналізу зібраних польових даних, а також розумних геоінформаційних сервісів) як під час безпосередніх польових досліджень, так і на етапі камеральної обробки результатів. Доведено, що впровадження елементів ШІ у систему практичних занять з освітнього компонента «Навчальна природничо-краєзнавча практика» не лише оптимізує рутинні процеси збору та систематизації краєзнавчого матеріалу, а й суттєво підвищує пізнавальну мотивацію здобувачів освіти, сприяє ефективному розвитку їхнього критичного мислення, дослідницьких навичок та цифрової компетентності. Окремо наголошується на важливості дотримання дидактичного балансу: запропоновано методичні рекомендації щодо гармонійного поєднання традиційних методів польових краєзнавчих досліджень із новітніми цифровими технологіями, щоб уникнути ризику втрати безпосереднього живого контакту здобувача з природою. Зроблено висновок, що штучний інтелект сьогодні є потужним інструментом-асистентом сучасного педагога та здобувача освіти, який здатний трансформувати природничо-краєзнавчу практику з базового екологічного спостереження в інноваційне, технологічно оснащене та глибоке науково-навчальне дослідження.

Література

1. Буднік С. В., Потапчук В. Д. Пошуково-дослідницька робота з палеонтологічного краєзнавства : навчально-методичний посібник. Луцьк, 2024. 160 с. URL: https://www.ranok.com.ua/info-stucnii-intelekt-asistent-sucasnogo-vcitelia-46298.html?srsltid=AfmBOorMvHu3HLlj6GGgtQowzTzmdO5bZUWQOU474SsRij7g9Id5yIc3 (дата звернення: 25.07.2026).

2. Доценко С. О., Ворожбіт-Горбатюк В. В., Собченко Т. М., Корнієнко М. Штучний інтелект – асистент сучасного вчителя : навчальний посібник. Харків : Ранок, 2025. 176 с.

3. Литвинова С. Г. Методичні підходи та дидактичні моделі використання мобільного навчання в умовах криз та розвитку штучного інтелекту. *Науковий вісник Ужгородського університету. Серія «Педагогіка. Соціальна робота»*. 2026. № 58. С. 162–170. DOI: https://doi.org/10.24144/2524-0609.2026.58.162-170

4. Морзе Н. В., Бойко М. А. Цифрова компетентність учителя в еру штучного інтелекту : навчальний посібник. Київ : Київський столичний університет імені Бориса Грінченка, 2025. 252 с.

5. Пріма Р. М., Буднік С. В. Підготовка вчителя початкової школи до використання дослідницьких проєктів із палеонтологічного

краєзнавства у професійній діяльності: прикладний аспект. *Актуальні питання у сучасній науці*. 2025. № 7(37). С. 1125–1134. DOI: https://doi.org/10.52058/2786-6300-2025-7(37)-1125-1134

Information about the author:
Budnik Svitlana,
Candidate of Pedagogical Sciences,
Associate Professor at Department of Theory
and Methodology of Primary Education
Lesya Ukrainka Volyn National University
13, Voli Avenue, Lutsk, Ukraine

CHAPTER 37

ЕКОЦЕНТРИЗМ І ВАЛЕОЛОГІЧНА КУЛЬТУРА В СУЧАСНОМУ ОСВІТНЬОМУ ПРОСТОРІ

Бузенко Ірина, Зелененька Ірина, Парчевська Анжела
DOI https://doi.org/10.30525/978-9934-26-714-7-37

ВСТУП

У системі сучасних освітніх і виховних, соціальних та культурних пріоритетів особливого значення набула концепція партнерської взаємодії людини та природи, що ґрунтується на діалозі, має гуманну основу. Саме така паритетна модель відносин формує сучасне світоглядне бачення співіснування людства й природи, кожної конкретної людини з природним середовищем, у якому вона перебуває. Натомість споживацьке ставлення до природи, що становило домінанту в ХХ ст., утрачає свою суспільну легітимність, асоціюючись із тоталітарним мисленням (із надмірним, гіпертрофованим антропоцентризмом, із нехтуванням ідеєю світового балансу, гармонії, гуманістичними цінностями).

Актуальність нашого наукового дослідження визначається погіршенням екологічної ситуації в Україні після 2022 р., спричиненим масштабними руйнуваннями (зокрема пошкодженням екосистем Національного природного парку «Олешківські піски», підривом Каховської гідроелектростанції, шкодою в межах Чорнобильської зони відчуження, безчинствами на території Запорізької атомної електростанції, нищенням флори й фауни в акваторії Чорного та Азовського морів тощо). Усе це, вочевидь, актуалізує негайну необхідність переосмислення змісту підготовки здобувачів загальної середньої та вищої освіти в Україні у бік орієнтації на формування стійких валеологічних компетентностей, здатності сприймати об'єктивний стан речей, приймати безпекові рішення в умовах глобальних змін і мілітарних ризиків, а також опановувати природоохоронні й здоров'язбережувальні практики, усвідомлюючи відповідальність за вплив людської діяльності на довкілля (колективну й особисту).

Доцільність проведення нашого дослідження зумовлена й потребою удосконалення перебігу освітнього процесу в закладах середньої та вищої освіти України, особливо щодо формування екологічної та

валеологічної компетентностей майбутніх фахівців. На сучасному етапі розвитку української освіти спостерігаємо недостатню підготовленість освітніх установ до ефективного реагування на сучасні виклики, зокрема й екологічні; це передусім пов'язано з обмеженою теоретико-методологічною базою та з недостатнім рівнем методичного забезпечення з означеної проблематики. Сучасні виклики, пов'язані з подоланням екологічних проблем і вирішенням валеологічних питань, що загострилися після початку повномасштабного вторгнення в Україну, актуалізують потребу збереження світового екобалансу, відновлення й покращення природного середовища, розвитку екоестетичних засад, фізичної культури та спорту як питомих складників виховання молоді в умовах глобалізації, удосконалення системи охорони здоров'я.

Щодо стану дослідження проблеми: питання освітньої підготовки в сучасних умовах за екологічним і валеологічним циклами, з гуманістичним спрямуванням, зі спрямуванням на формування фізичної культури та спортивної діяльності (від початкової освітньої ланки до старшої, у вищій школі) висвітлено у працях таких науковців, як Ю. Д. Бойчук[1], І. Д. Бех[2], М. Дубовис[3], Г. Г. Науменко[4], а також у розвідці Н. В. Левчук та І. Л. Бузенко[5]. Формування валеологічних компетентностей та екологічних компетенцій у здобувачів вищої педагогічної освіти (за предметними спеціальностями) дослідили такі вчені, як Ю. Бойчук[6], Ю. П. Шапран[7,8]; слушні міркування знаходимо в низці розвідок І. Л. Бузенко[9,10].

---

[1] Бойчук Ю. Д. Теоретико-методичні основи формування еколого-валеологічної культури майбутнього вчителя : автореф. дис. … д-ра пед. наук : 13.00.04. Харків, 2010. 44 с.

[2] Бех І. Д. Виховання особистості : у 2-х кн. Кн. 2. Особистісно орієнтований підхід: науково-практичні засади. Київ : Либідь, 2003. 344 с.

[3] Дубовис М., Короп Ю. Ігри та ігрові вправи для початкового навчання плавання : посібник для вчителя. Київ, 1991. 143 с.

[4] Науменко Г. Г. Освіта як системний чинник формування екологічної культури майбутніх учителів : автореф. дис. … канд. філос. наук : 09.00.10. Київ, 2009. 20 с.

[5] Левчук Н. В., Бузенко І. Л. Інноваційні педагогічні технології у діяльності викладача природничих дисциплін. *Наукові записки Вінницького державного педагогічного університету імені Михайла Коцюбинського. Серія «Педагогіка і психологія».* 2014. Вип. 41. С. 191–194.

[6] Бойчук Ю. Д. Теоретико-методичні основи формування еколого-валеологічної культури майбутнього вчителя : автореф. дис. … д-ра пед. наук : 13.00.04. Харків, 2010. 44 с.

[7] Шапран Ю. П. Екологічна компетентність майбутніх учителів біології: її сутність та діагностика. *Postępy w nauce w ostatnich latach. Nowych rozwiązań*. С. 29–36. URL: http://science.kpnu.edu.ua/portfolio/pedahohichnaosvita-teoriya-i-praktyka.html

[8] Шапран Ю. П. Сутнісні ознаки, структурні компоненти і вимірювання екологічної компетентності студентів-біологів педагогічного університету. *Педагогічна освіта: теорія і практика*. 2015. Вип. 18(1–2015). С. 320–325.

[9] Бузенко І. Л. Валеологічна компетентність майбутніх учителів. *І Міжнародна науково-практична конференція «Актуальні аспекти розвитку STEM-освіти у навчанні природничо-наукових дисциплін.* Кропивницький, 2018. С. 45–48.

[10] Бузенко І. Л. Валеологічна компетентність майбутнього педагога. *Міжнародні наукові дослідження: інтеграція науки та практики*. Одеса, 2018. С. 76–81.

Це дає нам вагомі підстави вважати, що формування у здобувачів середньої та вищої освіти в Україні відповідних компетентностей (екологічних та валеологічних) триває; оскільки навчальний процес був спрямований на регулювання професійної підготовки і не було досі предметом цілісного дослідження, ми фіксуємо нині лише дотичні до означеної тематики та проблематики міркування, на основі яких і сформуємо новий погляд, відповідний сучасним викликам.

Екологічні та валеологічні традиції, сформовані в наших предків, культуру гартів та їх відображення в мистецтві описав у багатьох історичних ілюстраціях Олекса Воропай[11], крізь призму мистецтва й культури це зробили на сучасному етапі І. А. Зелененька, В. І. Ткаченко у праці «Гарти: національні традиції, відображення в художній літературі, психоісторичний контекст»[12], а також у цьому ж напрямі добре попрацювали І. А. Зелененька, В. І. Ткаченко, Л. І. Дмитрук, І. Л. Бузенко у праці «Дидактична перспектива вивчення звитяг і гартів: національний контекст і культурно-мистецька парадигма»[13] та ін.

Реалізація комплексу вже окреслених у нашому дослідженні та подібних, що виникатимуть у плині реалізації екологічних та валеологічних концепцій сучасної цифровізованої освіти, завдань потребує кардинальних, змін у світогляді сучасників, а також поступальних реформістських заходів у всіх ланках освіти в Україні, антикризових змін і, щонайважливіше, комплексних суспільних перетворень, систематизації та структурування соціальних кластерів, покрокової консолідації діяльності всіх без винятку державних інституцій, перманентної ініціації щодо впровадження екоцентричних програм (відповідних економічним, політичним, соціальним, культурним, мистецьким та освітнім перетворенням)[14]. Модернізація національної освітньої доктрини[15] залежить значною мірою від внутрішніх ініціатив та ефективної співпраці України з міжнародними партнерами[16]. Загальні дидактичні міркування, дотичні до проблематики дослідження, знаходимо у праці І. Зелененької, Ю. Ткаченко, В. Колядич

---

[11] Воропай О. Звичаї нашого народу: етнографічний нарис. Ч. 1. Ч. 2. Мюнхен, 1958. 309 с.

[12] Зелененька І., Ткаченко В. Гарти: національні традиції, відображення в художній літературі, психоісторичний контекст. *Current issues of linguistics and translation studies*. Т. 33. 2025/3/27. С. 18–24. URL:https://apfp.khmnu.edu.ua/index.php/apfp/article/view/104

[13] Зелененька І., Ткаченко В., Бузенко І., Дмитрук Л. Дидактична перспектива вивчення звитяг і гартів: національний контекст і культурно-мистецька парадигма. *Педагогічна академія: наукові записки*. 2024. № 13. URL: https://pedagogical-academy.com/index.php/journal/article/view/539

[14] Державний стандарт початкової загальної освіти (проєкт) URL: ttps://mon.gov.ua/ua/osvita/zagalna-serednya-osvita/derzhavni-standarti

[15] Концепція екологічної освіти України. URL: http://shkola.ostriv.in.ua/publication/code-148b3b2021c2c/list-b407a47b26

[16] Державна національна програма «Освіта» («Україна XXI століття»). URL: http://zakon5.rada.gov.ua/laws/show/896-93-%D0%BF

«Інформаційно-комунікаційні технології у закладах освіти та їхній вплив на формування творчого потенціалу в умовах війни»[17]. Аспекти екофізичної культури в її освітній інтерпретації знаходимо у дослідженнях таких учених, як: А. М. Льовочкіна («Психологія розвитку екологічної культури студентської молоді»[18]), Б. Мисак («Формування військово-патріотичної готовності учнівської молоді до захисту Вітчизни»[19]), В. Мірошніченко, О. Ставицький («Фізичне вдосконалення та загартування як складник упровадження козацької педагогіки в патріотичному вихованні майбутніх офіцерів-прикордонників»[20]).

1. Особливості формування екоосвітньої терміносистеми та екокультури здобувачів освіти

Екологічна та валеологічна культура, за визначенням Г. Науменко[21], в умовах глобалізаційних процесів спрямована одночасно на взаємодію людини з природним середовищем і на розвиток її психічної сфери. Основне призначення взаємодії – діалог, спрямований на гармонію співіснування, на формування гуманістичних, духовно-ціннісних орієнтирів у наступних поколінь, на негайні зміни ставлення до природи, на нівеляцію споживацької моделі взаємодії з довкіллям. За своєю сутністю екокультура є своєрідним кодексом поведінки, нормативи якого коригуються, але основа ековалеологічної діяльності особистості – гуманність.

Звідси випливає формулювання моделі алгоритмізації ековалеологічної культури:

1) соціалізація в межах ризиків;

2) забезпечення умов самореалізації особистості у взаємодії з різнорідним середовищем;

3) збереження та розвиток екокультури та вироблення відповідних традицій;

---

[17] Зелененька І., Ткаченко Ю., Колядич В. Інформаційно-комунікаційні технології у закладах освіти та їхній вплив на формування творчого потенціалу в умовах війни. *Moderní aspekty vědy: LXIX. Díl mezinárodní kolektivní monografie / Mezinárodní Ekonomický Institut s.r.o.* Česká republika: Mezinárodní Ekonomický Institut s.r.o., 2026. str. 672. S. 298—311. URL: https://perspectives.pp.ua/public/site/mono/mono-69.pdf

[18] Льовочкіна А. М. Психологія розвитку екологічної культури студентської молоді : автореф. дис. … д-ра психол. наук : 19.00.07. Київ, 2013. 42 с.

[19] Мисак Б. Формування військово-патріотичної готовності учнівської молоді до захисту Вітчизни : автореф. дис. … канд. пед. наук : 13.00.07. Тернопіль, 2010. 24 с.

[20] Мірошніченко В., Ставицький О. Фізичне вдосконалення та загартування як складник упровадження козацької педагогіки в патріотичному вихованні майбутніх офіцерів-прикордонників. *Педагогіка, психологія та медико-біологічні проблеми фізичного виховання і спорту*. 2011. № 9. С. 83–86.

[21] Науменко Г. Г. Освіта як системний чинник формування екологічної культури майбутніх учителів : автореф. дис. … канд. філос. наук : 09.00.10. Київ, 2009. 20 с.

4) накопичення й актуалізація валеологічного досвіду;

5) формування морально-етичних критеріїв в оцінюванні ставлення людини до природи.

Ековалеологічна культура постала як інтегрована система знань, правових засад, соціальних норм, цінностей, моделей поведінки та світоглядних форм, що регулюють взаємодію людини із середовищем і забезпечують накопичення досвіду екологічної відповідальності на противагу безвідповідальності. Тому проблематика в межах ековалеологічної культури не одноманітна, а має міждисциплінарний характер і дотична до філософії, педагогіки, соціології, психології тощо. Філософські засади екології висвітлено у праці І. С. Лисака, І. А. Зелененької, В. І. Ткаченко, І. Л. Бузенко «Філософія руху опору в Україні у другій половині ХХ століття: світоглядна основа поколінь»[22]; соціальні аспекти та методичні підходи розроблено у праці С. І. Книш «Інноваційні педагогічні технології у еколого-валеологічній підготовці майбутніх учителів фізичного виховання»[23]. Серед основних складників ековалеологічної культури виокремимо ековалеологічну свідомість та ековалеологічну діяльність як дві взаємопов'язані форми, що підтвердужують практичну реалізацію проблеми.

Кризовий стан природного середовища, що масштабується глобально, зумовлює пошук нових ефективних моделей для впровадження ековалеологічної освіти, здатної забезпечити ефективне освоєння технологій, спрямованих на попередження споживацького використання природних ресурсів У зв'язку із цим доцільно використовувати такі поняття, як «ековалеологічна безграмотність», «ековалеологічна грамотність», що ґрунтуються на концепції, запропонованій Ю. Шапран[24] (ідеться про недостатній рівень людського усвідомлення наслідків бездумного втручання в екобаланс, природні процеси та біосоціальну природу людини, що негативно позначається на сталості розвитку суспільства).

За визначенням Ю. Бойчука[25], ековалеологічна культура – один із ключових компонентів культури особистості, загальної, професійної, педагогічної; вона є ключем до самоідентифікації кожного з нас, до

---

[22] Лисак І. С., Зелененька І. А., Ткаченко В. І., Бузенко І. Л. Філософія руху опору в Україні у другій половині ХХ століття: світоглядна основа поколінь. *Філософія і управління*. 2025. № 1(5). С. 14–21. URL: https://www.eu-scientists.com/index.php/fag/article/view/73

[23] Книш С. І. Інноваційні педагогічні технології у еколого-валеологічній підготовці майбутніх вчителів фізичного виховання. *Науковий часопис НПУ імені М. П. Драгоманова.* 2016. Вип. 3К 1 (70). С. 36–38.

[24] Шапран Ю. П. Екологічна компетентність майбутніх учителів біології: її сутність та діагностика. *Postępy w nauce w ostatnich latach. Nowych rozwiązań*. С. 29–36. URL: http://science.kpnu.edu.ua/portfolio/pedahohichnaosvita-teoriya-i-praktyka.html

[25] Бойчук Ю. Д. Теоретико-методичні основи формування еколого-валеологічної культури майбутнього вчителя : автореф. дис. … д-ра пед. наук : 13.00.04. Харків, 2010. 44 с.

самореалізації у соціумі й до професійного зростання особистості. У контексті глобалізаційних процесів ековалеологічна культура розглядається як інтегральна характеристика особистості, визначаючи готовність до діяльності, до ековалеологічної відповідальності, забезпечує результативність діалогу людини й природи, є показником компетентності та орієнтиром самовдосконалення.

Ековалеологічна культура здобувачів середньої та вищої освіти в Україні сприймається як узагальнена характеристика рівня сформованості потреб молоді, їхніх цінностей, здібностей. Інтенсивність прояву екокультури в різних видах діяльності здобувачів освіти може варіюватися залежно від індивідуальних особливостей кожної особистості, що чітко відображає її моральний і духовний потенціал. У межах нашого дослідження ековалеологічна культура як поняття розглядається комплексно, себто як похідне від категорії «ековалеологічна компетентність», що традиційно використовується як базовий термін[26].

В умовах сучасних глобалізаційних та мілітарних ризиків і викликів екологічне виховання й валеологічна спрямованість його набувають ознак передумов сталого розвитку суспільства, а власне екологічна освіта дедалі більше актуалізується, стає одним із пріоритетних напрямів педагогічної практики у світі. Модернізація освітньої системи, а також посилення глобальних екологічних ризиків, загрози екологічної кризи планетарного масштабу зумовили необхідність формування ековалеологічних компетентностей у плині підготовки здобувачів середньої та вищої освіти, щоб підсили життєві компетентності сучасника[27].

Особливої ваги в контексті гармонізації взаємодії суспільства й природного середовища набувають чотири напрями виховної діяльності:

1) формування ціннісного ставлення до довкілля та позитивного сприйняття природності навколишнього середовища;

2) розвиток гуманістичного ставлення до природи на основі засвоєння її функціонування, закономірностей перебігу природних процесів;

3) виховання небайдужості, дбайливого ставлення до світу;

4) розвиток умінь проєктувати в межах екодискурсу, прогнозувати природні явища, розуміти логіку природних процесів[28].

---

[26] Бузенко І. Л. Еколого-валеологічна компетентність у професійній підготовці вчителів. *ІІ Міжнародна науково-практична конференція «Сучасні тенденції розвитку науки».* Київ, 2018. С. 45.

[27] Бузенко І. Л. Екологічна компетентність учителя як передумова здійснення неперервної екологічної освіти і виховання. *Міжнародна науково-практична конференція «Методика навчання природничих дисциплін у середній та вищій школі» (ХХ ІV Каришинські читання).* Полтава, 2018. С. 66.

[28] Бузенко І. Л. Екологічна компетентність майбутніх учителів. *Всеукраїнська науково-практична конференція «Підготовка конкурентоздатних фахівців: виклики сучасності».* Кривий Ріг, 2018. С. 56.

Отже, формування ековалеологічних компетентностей у системі середньої та вищої освіти в Україні є одним із пріоритетних завдань сучасної етнопедагогіки. Важливими є визначення оптимального змісту ековалеологічного матеріалу з урахуванням індивідуальних і вікових особливостей кожного зі здобувачів освіти, добір ефективних методик навчання і методичних прийомів, а також визначення освітньої мети та змістового наповнення процесу навчання. Доцільним є використання творів мистецтва, пов'язаних із екодискурсом, нуклеарним дискурсом, що висвітлюють причини й наслідки катастроф, мотиви порушення глобальної екологічної рівноваги[29]. Усе це може допомогти в репрезентації цивілізаційного розвитку, змін у формуванні фізичної культури та спорту в середовищі українського народу, виписати традиції фізичного загартування та силових практик, що відображають співіснування людини з природою, гармонійне за своєю суттю, розкривають валеологічний вимір етногенезу українців[30]. Уважаємо, що ефективними формами організації навчальної діяльності можуть бути бесіди, практикуми, колективні творчі проєкти, дискусії, майстер-класи, тренінги тощо.

2. Ековалеологічні компетентності та їх релевантність: освітній екоцентризм і світовий екодискурс

Відштовхуючись від наукових положень Ю. Бойчука щодо ековалеологічних компетентностей та їх структурування, до яких уналежнено й полікультурні компетентності, уточнимо, що вони ґрунтуються на інтегрованих знаннях, транспредметних, а також становлять підґрунтя для інновацій у межах сучасної освіти. Їх формування є умовою освітнього процесу, його фундаменталізації та підвищення рівня освіченості особистості, розвитку безвідходних технологій, екологізації технологічної діяльності та виробничої, удосконалення екологічних стандартів, утвердження мислення ноосферного типу[31].

Сьогодні стратегія модернізації освіти безпосередньо пов'язана з доланням глобалізаційних викликів і потребує нового осмислення в ключі екологічному, що сприятиме валеологічному потенціалу сучасної

[29] Бузенко І. Л. Еколого-валеологічна компетентність у педагогічних коледжах. *Міжнародна науково-практична конференція: «Педагогіка і психологія: Актуальні проблеми досліджень на сучасному етапі».* Київ, 2018. С. 111.

[30] Бузенко І. Л. Особливості формування екологічної компетентності в початковій школі. *«Актуальні проблеми формування творчої особистості педагога в контексті наступності дошкільної та початкової освіти».* Вінниця, 2018. С. 56.

[31] Бузенко І. Л. Особливості формування еколого-валеологічної компетентності особистості як педагогічна проблема. *Сучасні тенденції розвитку науки.* Київ, 2018. С. 34.

особистості, закріпить гуманітарний вектор. Усвідомлення необхідності долання екологічної кризи стало важливим формантом у системі національної безпеки не лише України, а й багатьох інших держав. Орієнтирами цих процесів є:

1) гуманізація взаємин людини і природи;
2) формування ековалеологічної свідомості та його екоестетики;
3) розвиток полікультурності екосвітогляду;
4) активізація екологічного мислення;
5) розроблення валеологічної компетентності та розвиток екоестетичних цінностей.

У структурі професійної педагогічної компетентності екологічний та валеологічний складники перебувають у тісному взаємозв'язку та торкаються:

1) особистісних якостей суб'єктів освітньої діяльності;
2) професійної компетентності педагогічних працівників;
3) інтеграції екологічних і валеологічних знань у структурі професійної педагогічної підготовки;
4) розвитку екологічного та валеологічного типів мислення здобувачів освіти;
5) формуванню рефлексивних умінь та аксіологічного світогляду;
6) усвідомленню соціальної відповідальності за вирішення екопроблем;
7) удосконаленню здоров'язбережувальних технологій і практик у закладах освіти в Україні[32].

Тому актуальності набуває забезпечення релевантності екологічної та валеологічної діяльностей у сфері освітніх послуг, що передбачає їх відповідність потребам здобувачів освіти, стану довкілля, рівню сформованості валеологічного потенціалу соціуму, набутим знанням, умінням, навичкам і досвіду. Освітній процес у закладах середньої та вищої освіти мав би надалі ґрунтуватися на засадах збереження здоров’я людини й охорони навколишнього природного середовища. Такий підхід передбачатиме посилення еколого-валеологічної просвіти серед населення, серед здобувачів освіти, активізацію громадянської позиції та створення умов для особистісного розвитку молоді. На наше переконання, що випливає зі спостережень, підвищенню рівня знань, умінь і практичних навичок молоді в умовах глобальних трансформацій сприятиме досвідне формування відповідального ставлення, ресурсохберігальна

[32] Бузенко І. Л. Особливості формування еколого-валеологічної компетентності в педагогічних коледжах. *IX Міжнародна науково-практична інтернет-конференція молодих учених, аспірантів, студентів «Творчий пошук молоді – курс на ефективність».* Хмельницький, 2018. С. 78.

природи ставлення до природи, що зміцнить здоров'язбережувальні компетентності[33].

Підготовка фахівців у закладах вищої освіти супроводжується невирішеними питаннями теоретичного і практичного характеру. Це стосується недостатності наукового та методичного обґрунтування ековалеологічної компетентності здобувачів освіти в умовах глобальних викликів, серед яких – пандемії, катастрофи, воєнна агресія, порушення природної рівноваги, нераціональне, хижацьке використання природних ресурсів. До 2022 р. в українській педагогічній науці були практично відсутні комплексні дослідження щодо формування ековалеологічних компетентностей і навичок у здобувачів загальної освіти, що зумовило виникнення суперечностей щодо реалізації компетентнісного підходу в межах освітнього процесу[34].

Закономірно, що Національна стратегія розвитку освіти України нині визначає екологізацію освіти як один із пріоритетних напрямів державної політики щодо освіти, а недостатні темпи впровадження – однією з проблем сучасної системи освіти. Основним нормативним документом, що зарегламентував розвиток цієї сфери, є Концепція екологічної освіти України, за якою ключова роль у формуванні особистості з високим рівнем екологічної культури та з екоцентричним світоглядом відведена закладам загальної середньої освіти[35].

Результативність ековалеологічної освіти та успішність виховання в Україні безпосередньо залежать від рівня професійної компетентності педагогічних працівників та готовності здобувачів освіти до опанування специфічних знань, умінь і ціннісних орієнтацій. Це можливо за умов формування ековалеологічних компетентностей упродовж тривалості освітнього процесу. Тому сучасні дослідники наголошують на тому, що глобальна екологічна криза повинна знайти відображення у змісті освіти, адже загострення міжнародних конфліктів частіше пов'язане з боротьбою за ресурси та геополітичний вплив. У цьому контексті підвищення рівня освіченості й культури населення варто розглядати як комплексний механізм із запобігання екологічним загрозам. Подібну позицію обстоюють науковці

[33] Бузенко І. Л. Формування еколого-валеологічної компетентності майбутніх вчителів. *Збірник матеріалів ІІІ Всеукраїнської інтернет-конференції «Професійна підготовка фахівця в контексті потреб сучасного ринку праці».* Київ : ВНАУ, 2018. С. 56.

[34] Бузенко І. Л. Формування екологічної компетентності учнів початкових класів у навчально-виховному процесі. *Актуальні питання педагогіки та психології: шляхи теоретичного і практичного вирішення проблем.* Одеса, 2018. С. 47.

[35] Бузенко І. Л. Формування екологічної компетентності майбутнього педагога. *Міжнародна науково-практична конференція «Нове та традиційне у дослідженнях сучасних представників психологічних та педагогічних наук».* Львів, 2018. С. 41.

І. А. Зелененька, А. П. Вінінчук, В. П. Крупка, В. І. Ткаченко, В. Яручик у концептуальній праці «Ecological and Aesthetic Potential of Works about Chornobyl: Technogenic Disaster as a Literary Problem»[36], акцентуючи увагу на визначальній ролі нуклеарного дискурсу та ековалеологічної компетентності педагогів щодо забезпеченні якості освітнього процесу.

З огляду на це, алгоритм поведінки людини в умовах масштабної екологічної кризи може бути представлений у такому вигляді:

1) споживацька модель поведінки;
2) пасивне відсторонення від екопроблем;
3) орієнтація на задоволення потреб;
4) неврахування довгострокових наслідків.

Аналіз глобальних процесів, визначальних для розвитку сучасної цивілізації, посприяв формуванню нуклеарного дискурсу, утвердив його через мистецтво, у світовій науковій думці як напряму осмислення апокаліпсизму. У XXI ст. система середньої та вищої освіти України орієнтована на розвиток ключових компетентностей здобувачів освіти, які на іманентній основі визначають якість засвоєння знань. Водночас в умовах цифровізації ековектору недостатньо для забезпечення сталого цивілізаційного розвитку, оскільки освітній процес мав би формувати усвідомлення незворотності глобальних процесів, вивести у пріоритети цінності гуманізму та відповідальності за майбутнє. Тому впровадження ековалеологічних підходів, удосконалення форм навчання й виховання, популяризація фізичної культури, спорту та здорового способу життя сприяють підвищенню рівня національної стійкості та обороноздатності держави, а не лише зміцненню індивідуальної безпеки людини.

3. Проблема алгоритмізації ековалеологічних компетентностей

Закони України «Про освіту», «Про вищу освіту», а також Національна доктрина розвитку освіти України, Концепція розвитку екологічної освіти в Україні в XXI ст. визначають необхідність оновлення змісту, форм і методів навчання й виховання, це стосується й екологічної та валеологічної освітніх спрямованостей. Водночас сучасні виклики потребують подальшого інспірування, потрібні й нормативне забезпечення, розроблення адаптації до реалій сьогодення. Пропонуємо алгоритм підготовки здобувачів освіти, спрямований на формування творчої,

[36] Iryna Zelenenka, Alla Vinnichuk, Viktor Krupka, Viktoriia Tkachenko, Viktor Iaruchyk. Ecological and Aesthetic Potential of Works about Chornobyl: Technogenic Disaster as a Literary Problem. Interdisciplinary Literary Studies. *Pennsylvania State University Press*. Vol. 26, Is. 2. 2024/5/17. S. 237–259. URL: https://scholarlypublishingcollective.org/psup/ils/issue/26/2

соціально відповідальної особистості, кваліфікованого фахівця, здатного до професійної самореалізації в умовах глобалізації:

1) формування системи екологічних знань, умінь і навичок;
2) розроблення структури валеологічної культури особистості;
3) набуття компетентностей у межах фізичної культури;
4) формування сталої мотивації до занять через вибір спортивних уподобань;
5) виховання гуманістичних цінностей;
6) набуття професійної спрямованості;
7) усвідомлення потреби підтримки екологічної рівноваги (на локальному, регіональному та глобальному рівнях);
8) інтеграція природничих знань із практичним досвідом взаємодії людини та середовища;
9) ековектор у професійній діяльності;
10) екоестетика в інтересах сталого розвитку суспільства й цивілізації[37].

Беручи до уваги викладені положення, пропонуємо модель екологічних і валеологічних компетентностей, що охоплює два рівні.

А) Ключові компетентності (міжпредметні, надпредметні).

До міжпредметних компетентностей належать:

1) соціоекологія;
2) мілітарна екологія;
3) урбоекологія;
4) геоекологія;
5) агроекологія;
6) екологічний моніторинг;
7) ландшафтна екологія;
8) радіоекологія;
9) космічна екологія;
10) техноекологія;
11) екологічна токсикологія[38].

До надпредметних компетентностей уналежнимо такі компетентності:

1) здійснення екологічного спостереження та екологічного моніторингу;
2) аналіз багатофункціональних, міждисциплінарних і культурно доцільних видів людської діяльності;

---

[37] Левчук Н. В., Бузенко І. Л. Інноваційні педагогічні технології у діяльності викладача природничих дисциплін. *Наукові записки Вінницького державного педагогічного університету імені Михайла Коцюбинського. Серія «Педагогіка і психологія».* 2014. Вип. 41. С. 192.

[38] Бузенко І. Л. Формування екологічної компетентності учнів початкових класів у навчально-виховному процесі. *Актуальні питання педагогіки та психології: шляхи теоретичного і практичного вирішення проблем.* Одеса, 2018. С. 48.

3) застосування технологій екологічного коучингу для розв'язання актуальних індивідуальних і суспільних екологічних проблем.

Б) Загальні галузеві компетентності:

1) екоцентричний гуманізм;

2) громадянська компетентність;

3) екологічний інтелектуалізм;

4) полікультурна компетентність;

5) соціальна компетентність;

6) підприємницька компетентність[39].

Кожна з ключових компетентностей інтегруватиметься із загальногалузевими компетентностями, що конкретизуватимуться на рівні предметних компетентностей. До того ж ключові компетентності не будуть механічною сукупністю галузевих і предметних компонентів, а функціонуватимуть як інтегративна система, елементи якої перебувають у взаємозумовленості.

Тому, на наше переконання, що випливає зі спостережень, у здобувачів вищої освіти в Україні в умовах сучасних глобалізаційних викликів і процесів інтеграції доцільно формувати складники ековалеологічної компетентності так:

1) цілісне розуміння людини та природного середовища в єдності як основи екоцентричного світогляду;

2) здатність усвідомлювати та посильно розвивати синергетичний характер взаємодії природних і соціальних систем;

3) знання та розуміння синергетичних закономірностей в організації спостережень за світом та невтручання в системи довікілля;

4) сформованість практичних умінь і стійких навичок у здійсненні технологічної діяльності з дотриманням техніки безпеки та без порушень екологічних вимог;

5) здатність прогнозувати вплив людської діяльності та коригувати його, ураховуючи вектор на екологічні процеси та з орієнтиром на стан довкілля;

6) усвідомлення здоров'я та ресурсності людини як чільного серед визначальних показників якості умов довкілля та особливостей природного середовища;

7) розуміння індивідуального ековалеологічного потенціалу, ресурсності кожної особистості, зокрема й здобувача освіти;

[39] Бузенко І. Л. Формування екологічної компетентності майбутнього педагога. *Міжнародна науково-практична конференція «Нове та традиційне у дослідженнях сучасних представників психологічних та педагогічних наук».* Львів, 2018. С. 38.

8) володіння сучасними підходами до попередження катастроф і лих та подолання екокризових ситуацій;

9) сформованість системи духовних, моральних, гуманістичних, екологічних пріоритетів у системі та структурі особистісних цінностей;

10) здатність до системного проєктування і моделювання, а також до практичного застосування екологічних і валеологічних навичок;

11) стійка екоцентричнв спрямованість у середовищі взаємодії людини з природним середовищем як із соціальним;

12) позитивна мотивація до відстеження і збереження довкілля, зміцнення власного здоров'я, здоров'я в суспільстві, потенціалу планети;

13) мобільність знань, практичних умінь, навичок, необхідних для ефективної ековалогічної та валеологічної діяльностей, що ускладнені загалом в умовах сучасних викликів.

ВИСНОВКИ

Отже, формування ековалеологічної культури здобувачів загальної середньої та вищої освіти України в умовах глобалізаційних трансформацій потребує системного оновлення змісту, організаційних засад і технологій освітнього процесу. Використання мистецького потенціалу, у якому відображено наслідки глобалізаційних процесів і катастроф, окреслено як перспективне для екологічного виховання, що сприятиме глибшому осмисленню закономірностей еволюції та подоланню ідеологічних нашарувань. Такий підхід забезпечить утвердження гармонійної взаємодії тілесної та духовної природи людини з природою як єдиною системою живої та неживої природи, що може розглядатися у ключі феноменальності культурного розвитку та вважатися як один із виявів етногенетичних процесів. Особливого значення набуває упровадження проєктно орієнтованої навчальної та виховної діяльності, здатної забезпечити безперервний розвиток особистості, формування її ековалеологічних компетентностей, удосконалення фізичного розвитку та готовності до конструктивної взаємодії з природою надалі.

АНОТАЦІЯ

У дослідженні проаналізовано основні напрями освітньої діяльності крізь призму формування еколого-естетичного світогляду у здобувачів освіти та розвитку їхньої екологічної та валеологічної компетентностей. Особливу увагу звернено на питання впровадження інноваційних методичних підходів до навчання, що можуть слугувати альтернативою традиційним моделям вивчення різних дисциплін – від екології та безпеки життєдіяльності до мови й літератури, провідних детермінант

сучасного цивілізаційного розвитку, а також це важливо для організації фізичного виховання, популяризації здорового способу життя молоді та спортивної діяльності в закладах середньої та вищої освіти України. Тому дослідження спрямоване на обґрунтування моделі формування ековалеологічних компетентностей, що має ознаки концептуальної, зміст якої відповідає актуальним проблемам, ризикам і викликам XXI ст. Для ілюстрації запропонованих ідей використано матеріал, що вигідно репрезентує фізичну культуру, фізичне виховання, спорт у полікультурному контексті, з урахуванням потенціалу мистецьких практик, що ефективно для особистісного розвитку. Аргументовано, що сучасна воєнна агресія у світі, особливо та, що спрямована проти України (яка з 24 лютого 2022 р. набула форми повномасштабного вторгнення), спричинила руйнування та деформації природних екосистем, масштабну деструкцію в межах природних зон, порушення рівноваги у природі та виникнення дисбалансу й, відповідно, численних екологічних катастроф, що в той чи той спосіб порівнюються з техногенними у XX ст. Усе це засвідчило потребу змін в освітніх наративах, недостатню інтегрованість ековалеологічних підходів в український освітній простір, де до 2022 р. вони залишалися другорядним на периферії. Нині екопроблематика активно репрезентована у творах мистецтва, що входять до змісту навчальних програм дисциплін, що вивчаються в системі підготовки здобувачів закладів середньої та вищої освіти. Це дає вагомі підстави розглядати навчальний процес у світлі ековалеологічної евристики, що небезпідставно популяризується в українському суспільстві.

Література

1. Бех І. Д. Виховання особистості : у 2-х кн. Кн. 2. Особистісно орієнтований підхід: науково-практичні засади. Київ : Либідь, 2003. 344 с.

2. Бойчук Ю. Д. Теоретико-методичні основи формування еколого-валеологічної культури майбутнього вчителя : автореф. дис. … д-ра пед. наук : 13.00.04. Харків, 2010. 44 с.

3. Бузенко І. Л. Валеологічна компетентність майбутніх вчителів. *І Міжнародна науково-практична конференція «Актуальні аспекти розвитку STEM-освіти у навчанні природничо-наукових дисциплін».* Кропивницький. 2018. С. 45–48.

4. Бузенко І. Л. Валеологічна компетентність майбутнього педагога. *Міжнародні наукові дослідження: інтеграція науки та практики*. Одеса, 2018. С. 76–81.

5. Бузенко І. Л. Еколого-валеологічна компетентність у професійній підготовці вчителів. *ІІ Міжнародна науково-практична конференція «Сучасні тенденції розвитку науки».* Київ, 2018. С. 45–47.

6. Бузенко І. Л. Екологічна компетентність учителя як передумова здійснення неперервної екологічної освіти і виховання. *Міжнародна науково-практична конференція «Методика навчання природничих дисциплін у середній та вищій школі» (XX IV Каришинські читання).* Полтава, 2018. С. 65–69.

7. Бузенко І. Л. Екологічна компетентність майбутніх учителів. *Всеукраїнська науково-практична конференція «Підготовка конкурентоздатних фахівців: виклики сучасності».* Кривий Ріг, 2018. С. 56–59.

8. Бузенко І. Л. Еколого-валеологічна компетентність у педагогічних коледжах. *Міжнародна науково-практична конференція: «Педагогіка і психологія: Актуальні проблеми досліджень на сучасному етапі».* Київ, 2018. С. 111–114.

9. Бузенко І. Л. Особливості формування екологічної компетентності в початковій школі. *Актуальні проблеми формування творчої особистості педагога в контексті наступності дошкільної та початкової освіти*. Вінниця, 2018. С. 56–61.

10. Бузенко І. Л. Особливості формування еколого-валеологічної компетентності особистості як педагогічна проблема. *Сучасні тенденції розвитку науки*. Київ, 2018. С. 34–37.

11. Бузенко І. Л. Особливості формування еколого-валеологічної компетентності в педагогічних коледжах. *IX Міжнародна науково-практична інтернет-конференція молодих учених, аспірантів, студентів «Творчий пошук молоді – курс на ефективність».* Хмельницький, 2018. С. 78–84.

12. Бузенко І. Л. Формування еколого-валеологічної компетентності майбутніх вчителів. *Збірник матеріалів III Всеукраїнської інтернет-конференції «Професійна підготовка фахівця в контексті потреб сучасного ринку праці».* Київ : ВНАУ, 2018.

13. Бузенко І. Л. Формування екологічної компетентності учнів початкових класів у навчально-виховному процесі. *Актуальні питання педагогіки та психології: шляхи теоретичного і практичного вирішення проблем.* Одеса, 2018. С. 47–51.

14. Бузенко І. Л. Формування екологічної компетентності майбутнього педагога. *Міжнародна науково-практична конференція «Нове та традиційне у дослідженнях сучасних представників психологічних та педагогічних наук».* Львів, 2018. С. 37–41.

15. Воропай О. Звичаї нашого народу: етнографічний нарис. Ч. 1. Ч. 2. Мюнхен, 1958. 309 с.

16. Дубовис М., Короп Ю. Ігри та ігрові вправи для початкового навчання плавання : посібник для вчителя. Київ, 1991. 143 с.

17. Державна національна програма «Освіта» («Україна XXI століття»). URL: http://zakon5.rada.gov.ua/laws/show/896-93-%D0%BF (дата звернення: 08.06.2026).

18. Державний стандарт початкової загальної освіти (проєкт). URL: ttps://mon.gov.ua/ua/osvita/zagalna-serednya-osvita/derzhavni-standarti (дата звернення: 08.01.2026).

19. Iryna Zelenenka, Alla Vinnichuk, Viktor Krupka, Viktoriia Tkachenko, Viktor Iaruchyk. Ecological and Aesthetic Potential of Works about Chornobyl: Technogenic Disaster as a Literary Problem. Interdisciplinary Literary Studies. *Pennsylvania State University Press*. Vol. 26, Is. 2. 2024/5/17. S. 237–259. URL: https://scholarlypublishingcollective.org/psup/ils/issue/26/2 (дата звернення: 05.06.2026).

20. Зелененька І., Ткаченко В. Гарти: національні традиції, відображення в художній літературі, психоісторичний контекст. *Current issues of linguistics and translation studies*. Т. 33. Дата публікації 2025/3/27. С. 18–24. URL:https://apfp.khmnu.edu.ua/index.php/apfp/article/view/104 (дата звернення: 21.06.2026).

21. Зелененька І., Ткаченко В., Бузенко І., Дмитрук Л. Дидактична перспектива вивчення звитяг і гартів: національний контекст і культурно-мистецька парадигма. *Педагогічна академія: наукові записки.* 2024. № 13. URL: https://pedagogical-academy.com/index.php/journal/article/view/539 (дата звернення: 21.06.2026).

22. Зелененька І., Ткаченко Ю., Колядич В. Інформаційно-комунікаційні технології у закладах освіти та їхній вплив на формування творчого потенціалу в умовах війни. *Moderní aspekty vědy: LXIX. Díl mezinárodní kolektivní monografie / Mezinárodní Ekonomický Institut s.r.o.* Česká republika: Mezinárodní Ekonomický Institut s.r.o., 2026. str. 672. S. 298–311. URL: https://perspectives.pp.ua/public/site/mono/mono-69.pdf (дата звернення: 21.06.2026).

23. Зелененька І., Ткаченко В., Магельницька Д., Юрченко Є. Чорнобиль у нуклеарному дискурсі: література, музика, психоісторія. *Мистецтво в культурі сучасності: теорія та практика навчання.* 2025. Вип. 5. Т. 2. С. 87–95. URL: https://vspu.net/eduarts/index.php/journal/issue/view/8/10 (дата звернення: 21.06.2026).

24. Зелененька І., Ткаченко В., Дмитрук Л., Бузенко І., Сорочан А. Екоетичний та екоестетичний потенціал спадщини Анатолія Подолинного. *Педагогічна академія: наукові записки*. 2025. № 24. URL: https://pedagogical-academy.com/index.php/journal/article/view/1475 (дата звернення: 21.06.2026).

25. Зязюн І. А. Наукове осмислення освітнього простору культури в педагогічній теорії. *Імідж сучасного педагога. Науково-практичний освітньо-популярний часопис.* 2006. № 5–6. С. 12–16.

26. Книш С. І. Інноваційні педагогічні технології у еколого-валеологічній підготовці майбутніх учителів фізичного виховання. *Науковий часопис НПУ імені М. П. Драгоманова.* 2016. Вип. 3К 1 (70). С. 36–38.

27. Концепція екологічної освіти України. URL: http://shkola.ostriv.in.ua/publication/code-148b3b2021c2c/list-b407a47b26 (дата звернення: 09.06.2026).

28. Левчук Н. В., Бузенко І. Л. Інноваційні педагогічні технології у діяльності викладача природничих дисциплін. *Наукові записки Вінницького державного педагогічного університету імені Михайла Коцюбинського. Серія «Педагогіка і психологія».* 2014. Вип. 41. С. 191–194.

29. Лисак І. С., Зелененька І. А., Ткаченко В. І., Бузенко І. Л. Філософія руху опору в Україні у другій половині XX століття: світоглядна основа поколінь. *Філософія і управління*. 2025. № 1(5). С. 14–21. URL: https://www.eu-scientists.com/index.php/fag/article/view/73 (дата звернення: 08.06.2026).

30. Льовочкіна А. М. Психологія розвитку екологічної культури студентської молоді : автореф. дис. … д-ра психол. наук : 19.00.07. Київ, 2013. 42 с.

31. Мисак Б. Формування військово-патріотичної готовності учнівської молоді до захисту Вітчизни : автореф. дис. … канд. пед. наук : 13.00.07. Тернопіль, 2010. 24 с.

32. Мірошніченко В., Ставицький О. Фізичне вдосконалення та загартування як складник упровадження козацької педагогіки в патріотичному вихованні майбутніх офіцерів-прикордонників. *Педагогіка, психологія та медико-біологічні проблеми фізичного виховання і спорту*. 2011. № 9. С. 83–86.

33. Науменко Г. Г. Освіта як системний чинник формування екологічної культури майбутніх учителів : автореф. дис. … канд. філос. наук : 09.00.10. Київ, 2009. 20 с.

34. Шапран Ю. П. Екологічна компетентність майбутніх учителів біології: її сутність та діагностика. *Postępy w nauce w ostatnich latach. Nowych rozwiązań*. С. 29–36. URL: http://science.kpnu.edu.ua/portfolio/pedahohichnaosvita-teoriya-i-praktyka.html (дата звернення: 04.06.2026).

35. Шапран Ю. П. Сутнісні ознаки, структурні компоненти і вимірювання екологічної компетентності студентів-біологів педагогічного університету. *Педагогічна освіта: теорія і практика*. 2015. Вип. 18(1–2015). С. 320–325.

Information about the authors:
Buzenko Iryna,
Candidate of Pedagogical Sciences, Senior Lecturer
Municipal institution of higher education
"Vinnitsia Humanities and Pedagogical College"
13, Nahirna Street, Vinnytsia, Ukraine

Zelenenka Iryna,
Candidate of Philological Sciences, Associate Professor,
Associate Professor at the Department of Ukrainian Literature
Vinnytsia Mykhailo Kotsiubynskyi State Pedagogical University
32, Ostrozkoho Street, Vinnytsia, Ukraine

Parchevska Anzhela,
Higher Category Lecturer
Separate structural unit "Bar Professional College
of Transport and Construction
of the National Transport University"
7/32, Heroiv Maidanu Street, Bar, Ukraine

CHAPTER 38

МАЙНД-МЕППІНГ ЯК ЗАСІБ РОЗВИТКУ КОГНІТИВНИХ СТРАТЕГІЙ УЧНІВ НА УРОКАХ БІОЛОГІЇ ТА ХІМІЇ

Гиря Олексій
DOI https://doi.org/10.30525/978-9934-26-714-7-38

ВСТУП

Навчання природничих наук – це навчання, яке вимагає упровадження інноваційних технологій для опанування учнями основ сучасних концепцій та теорій. Ключовою метою біологічної та хімічної освіти має бути навчання учнів обробці інформації та активне мислення стосовно явищ та процесів, що вивчаються. Очікується, що учні набудуть умінь використовувати власні знання для вирішення нагальних життєвих проблем.

Відсутність ефективних методів навчання призводить до слабкого засвоєння учнями базових наукових понять, а системне використання навчальних посібників та робочих зошитів створює хибне відчуття впевненості, оскільки школярі вважають, що вже мають опорні знання. Як наслідок, учні епізодично роблять власні записи для впорядкування інформації протягом навчального процесу.

Учителі як фасилітатори мають використовувати інноваційні стратегії та моделі навчання, які спонукатимуть учнів до активного навчання. Когнітивні стратегії розраховані на активізацію високорівневих процесів мислення, що спонукають учнів до активності у навчанні. Когнітивні стратегії вчать учнів керувати, спрямовувати, регулювати та оцінювати результати власного навчання. Однією з таких стратегій є майндмеппінг, який може використовуватися для формування пізнавальних стратегій учнів.

Ментальні карти – це інструмент візуального мислення, який допомагає учням організовувати та структурувати навчальну інформацію так, щоб вона ефективно впливала на розвиток когнітивної сфери школяра[1]. Майндмеппінг є саморегульованою стратегією, яка покращує

[1] Б'юзен Т. Мапа думок. Львів : Видавництво Старого Лева, 2021. 224 с.

рівень навчальних досягнень із фундаментальних дисциплін, оскільки її потенціал використовується для покращення критичного мислення та творчих навичок учнів. Складання ментальних карт – це стратегія, яка допомагає учням запам'ятовувати деталі, розуміти концептуальні поняття, знаходити взаємозв'язки між об'єктами та явищами, висловлювати судження, аргументувати та спростовувати хибні тлумачення. Засвоєння учнями основ майндмеппінгу забезпечує неймовірну ясність та легкість у процесі прийняття рішень, використовуючи всі способи обробки інформації мозком: слова, зображення, числа, колір, ритм та просторове сприйняття, завдяки чому здобувач освіти буквально мислить усією своєю мозковою діяльністю. Тож необхідно заохочувати учнів до створення власних ментальних карт, у тому числі з використанням програмних засобів, щоб вони на власному досвіді з'ясували, чи допомагає їм майндмеппінг у кращому засвоєнні навчальної інформації.

1. Майндмеппінг та когнітивні стратегії навчання учнів

В умовах повномасштабної агресії російської федерації загальна середня освіта України змушена працювати в режимі дистанційного та частково змішаного навчання, що призводить до значних утрат навчального часу, особливо з базових дисциплін, таких як біологія та хімія. Це негативно впливає на розвиток креативного складника навчання, зокрема на когнітивні можливості учнів. У таких умовах більш ефективними виявляються стратегії, які дають змогу групувати навчальний матеріал із використанням інтегрованого та проблемного підходів, а також здійснювати акцент на розвитку когнітивної сфери учнів. У даних умовах потребують уточнення зміст та структура пізнавальної діяльності школярів на уроках біології та хімії. Важливим також є коригування цілей розвитку когнітивних стратегій учнів основної та старшої школи, а також засоби й етапи оволодіння даними стратегіями.

Під когнітивною стратегією розуміється цілеспрямована, певним чином організована й відрегульована послідовність дій, що свідомо вибирається учнями у процесі виконання пізнавальних завдань із метою набуття ними досвіду діяльності. Когнітивна стратегія має розкривати особливості індивідуального пізнання учня, повинна робити навчальний процес легшим, швидшим та більш ефективним[2]. Учню необхідно набувати вмінь розвивати і збагачувати когнітивні стратегії, оскільки саме вони є ключовими одиницями набуття й накопичення персонального досвіду.

[2] Дещенко О. М. Когнітивні стратегії розв'язання нестандартних конструкторських задач у процесі технічної творчості старшокласників. *Педагогічна академія: Наукові записки.* 2026. № 29.

Когнітивні стратегії повинні розкривати суб'єктивний досвід набуття учнем знань, демонструвати логічну послідовність його виконавських дій та допомагати педагогу розуміти те, яким чином зорієнтовані мисленнєві структури школяра у процесі навчання.

З огляду на власний десятирічний термін застосування у практиці навчання біології та хімії технології цілеспрямованого розвитку індивідуальних пізнавальних стратегій учнів, можемо констатувати, що когнітивна стратегія у навчанні має бути спрямована на:

– предметні дії;
– складники логічного пізнання;
– акти сенсорного пізнання;
– управлінські підструктури;
– аналітико-синтетичні здібності;
– дії, пов'язані з виконанням практично орієнтованих пізнавальних завдань.

Для того щоб отримати очікуваний ефект, педагог має спочатку розробити власну когнітивну стратегію, яка має відповідати таким вимогам:

1. Конструювання теоретичної логіки навчальної дисципліни, у якій учні мають бути зацікавленими партнерами, а не звичайними виконавцями певних завдань.

2. Навчальна інформація має надаватися учням у форматі, який із високою часткою вірогідності буде цікавим для сприйняття.

3. Із метою підвищення інтересу учнів до пізнання нового необхідно використовувати елементи інноваційних технологій, зокрема проблемно-орієнтованого, інтегративного та проєктного навчання.

4. Вимоги до когнітивної діяльності учнів мають відповідати реаліям сучасної української школи. Вони мають бути на такому рівні, щоб учні не втратили інтерес до навчання через надмірну складність.

5. Пізнавальні завдання мають бути зростаючої складності.

6. Педагог має забезпечувати систематичний, оперативний та дієвий зворотний зв'язок з учнями.

7. Учитель має розробити систему стимулювання розвитку когнітивної сфери учнів.

8. Максимально конкретно, коректно та доказово мають аналізуватися всі елементи, які включає пізнавальна стратегія учня.

9. Надавати учням свободу вибору стратегії виконання поставлених навчальних завдань.

Ураховуючи проблеми, що виникають у процесі розвитку когнітивних стратегій на навчальних заняттях із біології та хімії, пропонуємо

застосування майндмеппінгу, який суттєво полегшує сприйняття школярами навчальної інформації та її осмислення. Ментальна карта також надає можливість побудови власної пізнавальної стратегії та дає змогу візуалізувати сутність проблеми, насамперед тоді, коли вона має абстрактний характер[3].

Розглянемо основні напрями інтелект-карт для збільшення ефективності розвитку когнітивних навичок. Насамперед виділимо їхній вплив на формування гностичних умінь, які є основним показником оволодіння навчальним матеріалом та засвоєння практичних навичок на уроках біології та хімії. О. Авдєєва вважає, що основою для формування когнітивних стратегій на уроках хімії мають бути такі автоматизовані дії-навички:

а) використання сучасної наукової термінології;

б) опанування символів хімічних елементів та алгоритмів складання хімічних формул;

в) алгоритмічний підхід до розв'язання завдань та вправ;

г) засвоєння правил складання хімічних рівнянь;

г) застосування хімічного обладнання та посуду за призначенням;

д) безпечне виконання основних дій у процесі виконання експериментальних завдань;

е) дотримання встановлених правил із техніки безпеки, а також правил роботи в кабінеті[4].

На основі вироблених стандартних стратегій надалі мають формуватися більш складні, систематизовані, які будуть певною мірою впливати на розвиток когнітивної сфери учня. Вони мають забезпечувати варіативність у здатності школяра пізнавати довкілля й стати запорукою для розкриття його індивідуальних особливостей та створення умов для розроблення власної когнітивної стратегії.

Таким чином, гностичні вміння мають формуватися у тісній взаємодії педагога та учня у мінливих умовах, що створює необхідні передумови не лише для зростання навчальних досягнень школяра, а й для успішності в майбутньому професійному житті за рахунок формування чіткої системи усвідомлених умінь та навичок, відборі оптимальних способів реалізації креативної діяльності та їх аналізу.

На нашу думку, саме технологія майндмеппінгу є ефективним чинником розвитку гностичних умінь здобувачів освіти, оскільки вони поєднують

---

[3] Paige V. Mind Mapping: Making connections with Images and colour. *Delta Journal of eduction.* 2017. № 2. P. 1–10.

[4] Авдєєва О. Ю. Формування гностичних умінь учнів із хімії як педагогічна проблема. *Наукове забезпечення технологічного процесу XXI сторіччя.* Чернівці, 2020. Т. 4. С. 86.

найбільш важливі характеристики об’єктів та явищ, створюючи необхідні умови для розвитку когнітивних стратегій учня (рис. 1).

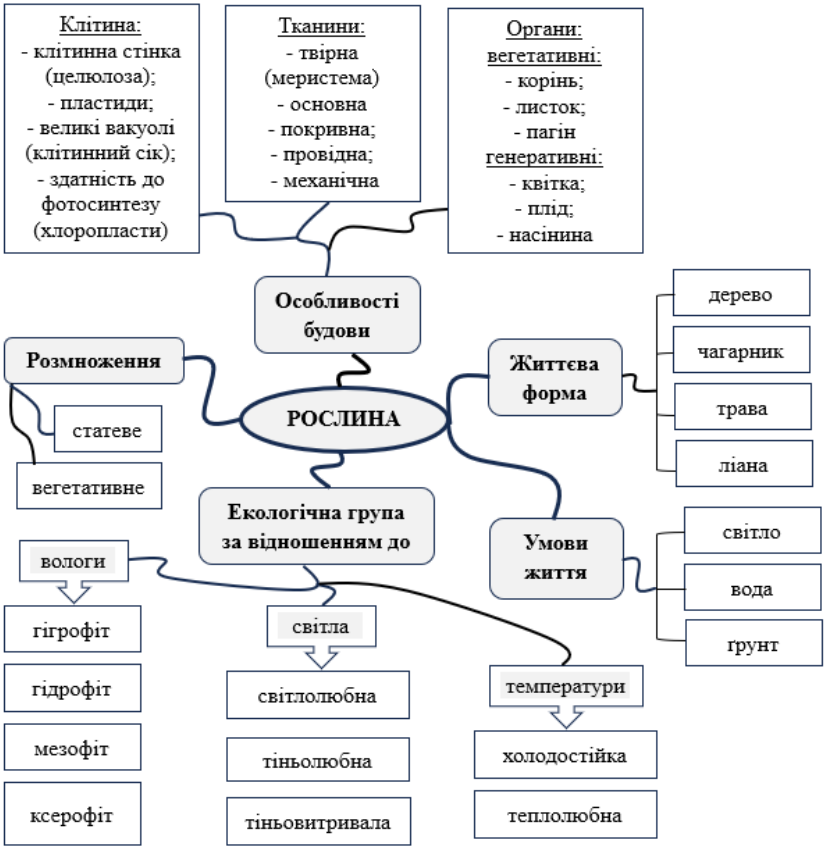


Рис. 1. Стратегія аналізу сутності об’єкта

Відповідно до вимог Нової української школи, формування когнітивних стратегій має здійснюватися на основі інтегрованого підходу до навчання учнів. Ми вважаємо, що інтеграція можлива лише за використання таких умов:

– спорідненість наук, що становлять основу для інтеграції;
– наявність значущих характеристик у об’єкта навчання;
– побудова теоретичних концепцій стосовно структури уроку;
– використання універсальних методів для аналізу сутнісних характеристик даного об’єкта.

Під час навчання учнів основам біології та хімії педагог має формувати у них стійке поняття про те, що наявні універсальні природні закони базуються на біологічних, хімічних, фізичних, геологічних та соціальних явищах та процесах.

З опорою на ці загальні закони природи набагато простіше формувати когнітивну стратегію учня для аналізу сутності певного запропонованого вчителем процесу (рис. 2).

Процес розвитку уміння створювати власну когнітивну стратегію передбачає також формування в учнів умінь презентувати її своїм однокласникам, аргументувати її особливості та переваги. Із цією метою також можна використати інтелект-карту[5]. Її застосування сприяє розвитку креативного мислення, надає можливість окреслити власну позицію, розвиває уміння доносити до оточення власні судження, поглиблює базові знання з предмета[6].

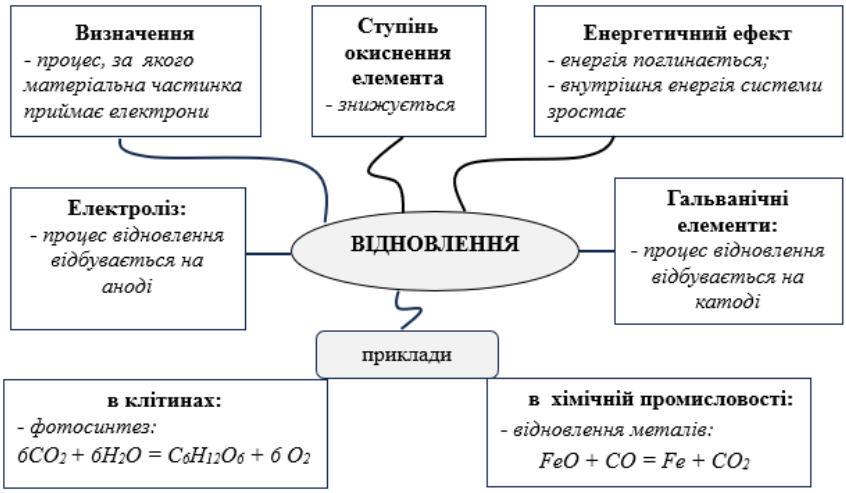


Рис. 2. Стратегія аналізу сутності процесу

Стосовно стратегій запам'ятовування, то вони можуть використовуватися на етапі опанування теоретичного матеріалу, наприклад складання схем дигібридного схрещування, складання рівнянь хімічних реакцій чи

[5] Лавренова М. В. Ментальні карти як новації в освітньому просторі. *Науковий вісник Мукачівського державного університету. Серія «Педагогіка та психологія».* 2019. Вип. 1. С. 36–39

[6] Позднякова Т. Є. Візуалізація та структурування інформації за допомогою ментальних карт на уроках біології : науково-методичний посібник. Рівне : РОІППО, 2018. 50 с.

розгляду екологічних чинників. Вони передбачають створення стратегії ментальних зв'язків: групування, співставлення, поєднання, створення інтелект-карт чи інших способів візуалізації інформації (рис. 3).

Когнітивні стратегії мають за мету безпосередній аналіз та мисленнєве перетворення навчального матеріалу. Вони також мають за мету добір матеріалу для вивчення відповідно до задекларованої педагогом мети. Вони включають такі складові компоненти:

– формулювання основної ідеї чи гіпотези;
– робота з графічними формами на етапі повторення навчального матеріалу;
– добір та використання алгоритмів, формул, інструкцій;
– розумове комбінування матеріалу;
– складання інтелект-карт;
– формулювання прикінцевих висновків;
– рефлексія[7].

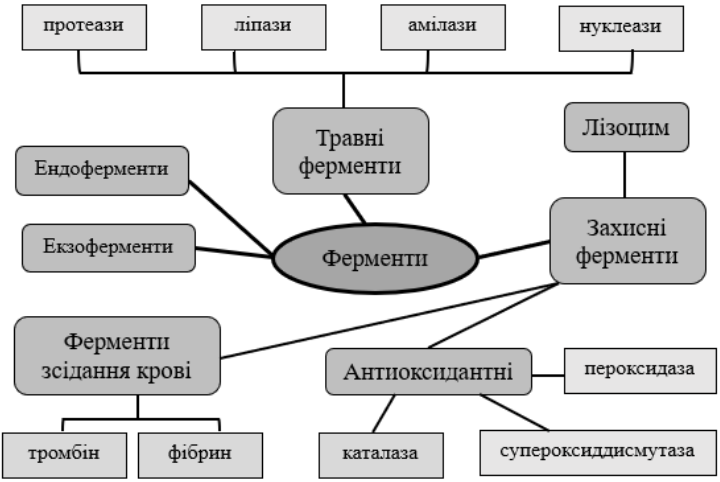


Рис. 3. Стратегія створення ментальних зв'язків

Типовим прикладом когнітивної стратегії є розв'язання розрахункових задач. Когнітивна діяльність із розв'язування розрахункових задач передбачає:

[7] Matook S., Wang Y. M., Koeppel N., Guerin S. Metacognitive skills in low-code app development: Work-integrated learning in information systems development. *Journal of Information Technology.* 2023. Vol. 39. № 1. P. 41–70.

– пізнання процесу перетворення;
– виділення структури даного процесу;
– задіяння конкретних способів діяльності;
– побудова відповідної стратегії;
– презентація стратегії (рис. 4).



Рис. 4. Стратегія розв'язання розрахункової задачі

Після закінчення розв'язання задачі необхідно провести рефлексію з метою покрокового аналізу запропонованої учнем стратегії.

Використання біологічних та хімічних задач зі зростаючим ступенем складності дає змогу педагогу об'єктивно оцінити рівень когнітивних умінь та навичок учня, а також постійно розвивати вибрану ним стратегію. За групової форми організації навчальної діяльності учням може бути запропонований ланцюжок розрахункових задач різного рівня складності, що дасть змогу школярам постійно вдосконалювати власні креативні навички[8].

Саме тому важливим складником розвитку когнітивних стратегій учнів уважаємо комунікативну стратегію. Вона передбачає формування у школяра усвідомленої лінії комунікативної поведінки у вибраній ним ситуації спілкування, яка передбачає комунікацію з однокласниками з метою подолання труднощів, викликаних браком теоретичних знань чи практичних навичок. Особливо важливою дана стратегія є на етапі узагальнення та систематизації вивченого матеріалу (рис. 5).

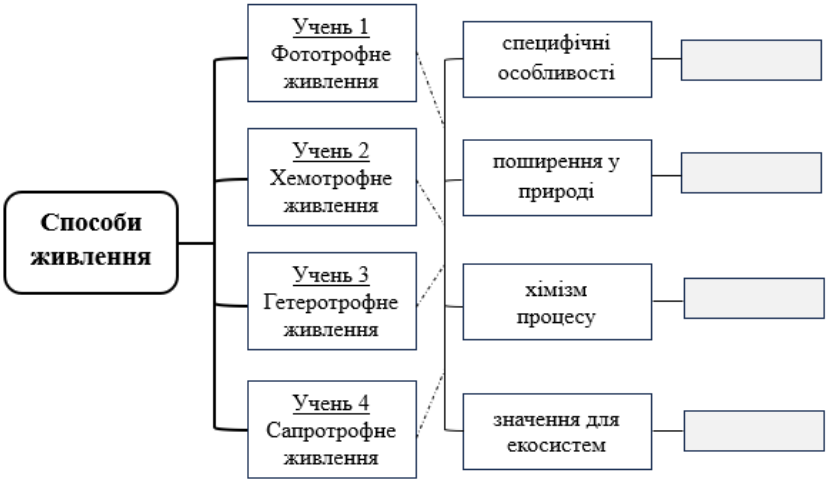


Рис. 5. Стратегія узагальнення теоретичних знань

Узагальнення та систематизація когнітивних навичок учнів є важливим етапом кожного навчального заняття, проте особливого значення цей процес набуває на уроках узагальнювального повторення, коли увага учнів зосереджується на найважливіших питаннях теми (розділу), взаємозв'язках

[8] Оксентюк Н. В. Можливості застосування ментальних карт у навчальному процесі. *Технології навчання.* 2015. Вип. 15. С. 194–208.

між ними. Під узагальнювальним повторенням ми розуміємо процес установлення інтегративних зв'язків між окремими поняттями, вивченими у різний час, та засвоєння їх у певній органічній системі. У процесі узагальнення знань остаточно формується уявлення про фундаментальні взаємодії природних сил і, як підсумок, перехід до осмислення наукової картини світу.

2. Вплив майндмеппінгу на розвиток індивідуальних пізнавальних стратегій учнів на уроках біології та хімії

Метою проведеного емпіричного дослідження було виявлення стратегій, які використовують учні 10-х класів у процесі розв'язання тестових завдань із біології та хімії, а також аналіз сутності наявних відмінностей між даними стратегіями. У дослідженні взяли участь 50 десятикласників Комунального закладу «Сумський ліцей № 9» Сумської міської ради (25 учнів експериментального та 25 учнів контрольного класу). Учні експериментального класу три роки навчалися за технологією візуалізації навчальної інформації засобами майндмеппінгу, учні контрольного класу опановували навчальний матеріал за стандартними технологіями навчання. Їм було запропоновано розв'язати тестові завдання з кожного предмета, застосовуючи метод «think-aloud», після чого проводилися напівструктуровані інтерв'ю для з'ясування їхніх підходів до розв'язання запропонованих завдань. Отримані дані із записів та інтерв'ю були транскрибовані й проаналізовані за допомогою програмного забезпечення для отримання якісних результатів досліджень. Отримані результати дають змогу зробити висновок, що для кожного предмету учні застосовували специфічні пізнавальні стратегії.

Під час роботи над завданнями з біології учні спиралися на стратегії, що сприяли розумінню навчального матеріалу, зокрема коментоване читання та виділення концептуальних елементів запитання. Розв'язання завдань із хімії передбачало такі стратегії, як самостійне складання алгоритму, метод спроб та помилок, використання математичних рівнянь тощо.

Окрім когнітивних, десятикласники також використовували метакогнітивні стратегії, наприклад перегляд і позначення окремих складників базових понять на графіках та рисунках (хімія), перефразування опорних понять та критеріальний аналіз наукового тексту (біологія). Установлено, що на типи й кількість застосовуваних стратегій впливали характеристики самих завдань, зокрема наявність візуальних матеріалів (ментальних карт) чи пояснень.

Когнітивні та метакогнітивні стратегії, що використовувалися учнями у процесі розв'язання завдань із біології та хімії, спочатку оцінювалися у власному контексті, а потім було проведено порівняльне дослідження.

На першому етапі учням було запропоновано по п’ять тестових запитань із кожної навчальної дисципліни з вибором однієї правильної відповіді. Запитання з біології стосувалися розділу «Основи генетики», з хімії – «Ненасичені вуглеводні». Причина, чому саме цим розділам надавалася перевага, полягає у тому, що запитання із цих розділів точно включалися до тестових завдань НМТ останніх трьох років і що ці розділи надають можливість учням застосовувати різноманітні пізнавальні стратегії. Завдання були середньої та підвищеної складності, включаючи графіку, малюнки та пояснення, у яких можна активно використовувати стратегії аналізу, прогнозування та вирішення проблем.

На другому етапі емпіричного дослідження учням було запропоновано напівструктуровані запитання для інтерв’ю. Ці запитання слугували для підтвердження використання учнями пізнавальних когнітивних та метакогнітивних стратегій під час розв’язання завдань із біології та хімії. Після виконання тестових завдань учням була запропонована серія запитань, наприклад «Чому під час розв’язання задачі вами була використана саме ця формула?» або «Чому ви виділили деякі терміни ручкою у процесі розв’язання завдання?».

У табл. 1 подано результати дослідження когнітивних пізнавальних стратегій, використаних учнями у процесі розв’язання тестових завдань із біології та хімії.

Аналізуючи вплив майндмеппінгу на розвиток у десятикласників когнітивних стратегій, можна зробити такі висновки:

1. Найбільший вплив застосування ментальних карт здійснює на стратегії, пов’язані зі згортанням навчальної інформації, зокрема аналіз рисунків, графіків та розуміння хімічних формул.

2. Важливим є позитивний вплив ментальних карт на стратегію коригування етапів розв’язання завдання та пришвидшення складання етапів стратегії за рахунок кращого розуміння сутності проблеми.

3. У цілому кращий ефект застосування майндмеппінгу дало на уроках з органічної хімії. Ми пояснюємо це тим, що даний розділ хімії характеризується більш чіткими причинно-наслідковими зв’язками та усталеними класифікаційними закономірностями.

4. Мінімальний вплив технологія майндмеппінгу у процесі дослідження здійснювала вплив на такі стратегії, як знаходження пропорцій, уміння конспектувати та точність відповідей на біологічні запитання. Ми пов’язуємо це з тим, що в останні роки зменшено кількість годин математики та зниження рівня комунікативної культури учнів через запровадження дистанційної форми навчання.

Таблиця 1

Когнітивні стратегії, що використовувались учнями у процесі розв'язання завдань із біології та хімії

Стратегія	Біологія			Хімія		
	КК	ЕК	Коефіцієнт кореляції	КК	ЕК	Коефіцієнт кореляції
Розуміння сутності проблеми	48	60	1,25	44	56	1,27
Аналіз числових значень	40	64	1,6	36	54	1,5
Уміння конспектувати	52	56	1,08	60	64	1,07
Вплив сутності проблеми на послідовність дій	36	48	1,33	32	52	1,62
Точність відповідей на запитання	40	48	1,2	36	52	1,44
Розуміння базових понять	44	64	1,45	36	48	1,33
Знаходження взаємозв'язків між частинами цілого	40	52	1,3	32	48	1,5
Розуміння формул	44	52	1,18	36	56	1,56
Тлумачення співвідношень	44	60	1,36	32	44	1,38
Знаходження пропорцій	36	44	1,22	36	40	1,1
Метод проб та помилок	32	44	1,38	28	40	1,43
Використання графічних зображень	24	36	1,5	20	32	1,6
Аналіз вихідних даних	40	56	1,4	32	44	1,38
Аналіз рисунків	36	60	1,67	32	52	1,63
Аналіз графіків	32	44	1,38	28	44	1,57
Уміння вносити корективи	24	36	1,5	24	40	1,67

5. Відзначаємо зростання такої універсальної стратегії, як метод проб та помилок, причому як на заняттях з біології, так і на уроках хімії.

6. Ураховуючи, що когнітивні стратегії значною мірою впливають на розвиток предметних компетенцій, відзначаємо їхній суттєвий вплив на формування базових систем понять.

Окрім того, нами було досліджено вплив майндмеппінгу на розвиток мнемічних та соціальних стратегій десятикласників (табл. 2).

Як видно з табл. 2, найменший вплив ментальні карти здійснюють на формування соціальних стратегій. Ми пояснюємо це тим, що в умовах дистанційного та змішаного навчання групове спілкування учнів одного класу суттєво обмежено. Разом із тим відзначаємо позитивний вплив майндмеппінгу на тлумачення наукових законів та концепцій, що досить важливо для формування єдиного природничо-наукового світогляду.

Таблиця 2

Результати дослідження впливу ментальних карт на формування пізнавальних стратегій учнів (у відсотках)

Стратегія	Біологія			Хімія		
	КК	ЕК	Коефіцієнт кореляції	КК	ЕК	Коефіцієнт кореляції
Мнемічні стратегії						
Запам'ятовування нових понять	52	64	1,23	40	52	1,3
Використання наукових номенів	32	44	1,38	28	40	1,43
Тлумачення наукових концепцій та законів	24	32	1,33	28	44	1,57
Робота з табличним матеріалом	48	52	1,08	40	48	1,2
Соціальні стратегії						
Розподіл функцій у складі малої навчальної групи	28	36	1,28	32	36	1,12
Кооперування з більш досвідченими учнями	24	36	1,5	28	36	1,29
Спілкування через Інтернет	40	48	1,2	44	48	1,1

Таким чином, можна зробити висновок, що характеристики біологічних та хімічних завдань із вибором однієї правильної відповіді, тобто те, чи містять завдання графіки, таблиці, рисунки чи лише текст, чи вимагають вони лише числових операцій, впливають на частоту, кількість та типи стратегій, що використовуються у процесі розв'язання цих завдань. Оскільки зміст та навчальні галузі завдань, запропонованих для цього дослідження, відрізняються від типових, можна зробити висновок, що когнітивні стратегії, які учні використали у процесі розв'язання завдань, є важливими інструментами, що дають їм змогу правильно відповідати на завдання.

Окремо для десятикласників було проведено тестування з метою визначення впливу майндмеппінгу на формування метакогнітивних стратегій учнів (планування, самоконтроль, саморефлексія). Експериментальний клас використовував ментальні карти на уроках хімії та біології, контрольний клас – ні. Для експериментальної групи був проведений короткий тренінг із використання метакогнітивних стратегій (планування пізнавальної діяльності (визначення цілей, часових рамок), самоконтроль (аналіз розуміння проблем, «помітки на полях»), саморефлексія (власна оцінка руху за стратегіями)). Пісоя завершення вивчення тем «Основи генетики» та «Ненасичені вуглеводні» всі учасники виконали тест, що включав як теоретичні, так і практичні завдання. Теоретична частина тесту складалася з п'яти запитань (по 1 балу) та трьох

практичних завдань (разом 7 балів). Максимальний загальний бал – 12. У табл. 3 наведено результати проведеного тесту.

Таблиця 3

Вплив майндмеппінгу на формування метакогнітивних стратегій десятикласників

Клас	Середній бал (загальний)		Теоретичний тест		Практичні завдання	
	біологія	хімія	біологія	хімія	біологія	хімія
Контрольний	8,3	7,6	3,7	3,4	4,6	4,2
Експериментальний	8,8	8,4	3,8	3,5	5,0	4,9

Із табл. 3 видно, що застосування ментальних карт на уроках біології та хімії найбільше впливає на практичний складник навчального компоненту. Це пояснюється тим, що ментальні карти більше орієнтовані на формування досвіду діяльності учнів.

Таким чином, можна констатувати, що навчання з використанням майндмеппінгу має більш позитивний вплив на когнітивні навчальні досягнення учнів порівняно з традиційним навчанням. Важливими чинниками ефективності навчання є також предмет навчання та рівень освіти.

У процесі емпіричного дослідження було з'ясовано, що учням подобається складати інтелект-карти з певних розділів біології, а на заняттях із хімії вони використовують дану стратегію значно рідше. Ми пов'язуємо це з тим, що значна частина хімічних понять має абстрактний характер, тому в учнів виникають труднощі з процесом візуалізації даних понять. Уважаємо, що ситуацію можна покращити за рахунок більш широкого використання на уроках хімії проблемно-орієнтованих та практично спрямованих завдань, які допоможуть учням конкретизувати складний навчальний матеріал.

Отримані результати дають можливість стверджувати, що використання інтелект-карт у процесі розвитку когнітивних стратегій учнів має на увазі не лише співпрацю педагога та учня, а й створення комфортних умов, які знімають психологічну напругу.

Найширший простір на навчальних заняттях із біології майндмеппінг надає у процесі розгляду проблем, пов'язаних із вивченням концептуальних законів та теорій. Для наочності наведемо відповіді учня контрольного та учня експериментального класу на запитання «Аргументуйте сутність хромосомної теорії спадковості» (рис. 6, 7).

Сутність хромосомної теорії спадковості Т. Моргана

1. Характеризує порядок розташування генів в хромосомах.
2. Набір генів у різних хромосомах неоднаковий.
3. Саме хромосоми є основою спадковості живих організмів.
4. Соматичні та статеві клітини мають різний набір хромосом.
5. Гени, що знаходяться в хромосомах можуть утворювати групи щеплення.
6. Гомологічні хромосоми можуть обмінюватися певними ділянками.
7. Відстань між генами вимірюється в морганідах.
8. Чим менша відстань між генами, тим ймовірніша можливість щепленого успадкування.
9. За рахунок щепленого успадкування зростає різноманітність ознак у потомства.

Рис. 6. Відповідь на запитання учениці контрольного класу Алли К.

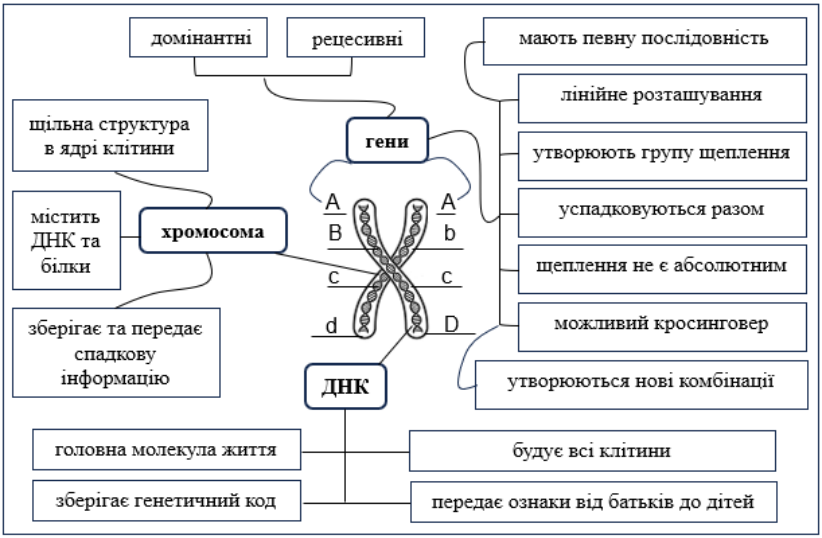


Рис. 7. Відповідь на запитання учениці експериментального класу Ольги П.

У процесі інтерв'ювання учнів було з'ясовано переваги та недоліки застосування ментальних карт на уроках біології та хімії. Результати даного аспекту дослідження подано на рис. 8 та 9.



Рис. 8. Переваги ментальних карт (на думку учнів)

Переважна частина учнів висловила судження про позитивний вплив інтелект-карт на розвиток уяви та творчого мислення, а також на можливість моделювання причинно-наслідкових зв'язків. Потребує удосконалення процес концентрування ключових понять, яких особливо багато у біології, та моделювання інтегрованих зв'язків, що інколи суттєво ускладнюється часовими рамками вивчення базових теорій та законів у різних навчальних дисциплінах.



Рис. 9. Недоліки майндмеппінгу (на думку учнів)

Маємо погодитися з думками учнів стосовно підвищених затрат часу на моделювання інтелект-карт, однак констатуємо, що з часом ця вада поступово зникає. Цілком зрозуміло, що процес складання ментальних карт потребує додаткових мисленнєвих зусиль, але це, своєю чергою, розвиває когнітивну сферу учня та розширює його інтелектуальні спроможності. Судження учнів стосовно низького рівня їхньої графічної грамотності можуть стати основою для прийняття ключових рішень МОН України стосовно ролі математичних наук у сучасній освіті, особливо у світі нинішніх дискусій, які відбуваються за результатами останнього державного тестування.

Стосовно програмного забезпечення, яке учні використовують у процесі створення ментальних карт, відповіді учнів були більш однозначними (рис. 10).

Опитування показало, що частина учнів використовує два-три види програмного забезпечення залежно від складності поставленого завдання. Найчастіше це безкоштовні програми або програми з обмеженим дизайном.

Результати проведеного емпіричного дослідження дають змогу зробити певні рекомендації педагогам стосовно впливу майндмеппінгу на формування в учнів когнітивних стратегій.

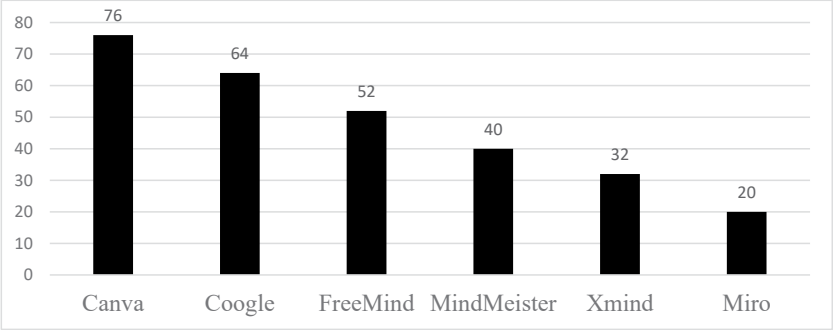


Рис. 10. Застосунки, що використовуються учнями для створення ментальних карт

Пропонуємо декілька найбільш поширених стратегій, що використовуються у повсякденному навчанні:

1. Експліцитне навчання з опорою на актуалізацію базових знань, моделювання застосування знань та навичок, забезпечення актуальних умов для самостійного навчання та рефлексії.

2. Підтримка учнів у плануванні стратегій, моніторингу навчальних досягнень та самооцінці їхньої навчальної діяльності.

3. Застосування засобів ефективної візуалізації процесів та явищ із метою постановки учнями конкретних та досяжних навчальних цілей.

4. Моделювання проблемних ситуацій засобами вербалізації процесів мислення, що використовуються для розгляду, аналізу та вирішення проблем.

5. Використання інтегрованих ментальних карт із метою стимулювання процесів мислення, а також здійснення зворотного зв'язку та реалізації можливостей для розширення сфер навчання.

Уважаємо, що зусилля, спрямовані на розвиток в учнів когнітивних стратегій:

а) надають можливість учням співпрацювати з однокласниками та приймати рішення з дорослими стосовно того, як вони навчаються та яким чином оцінюються результати даного навчання;

б) спонукають учнів до керування стратегіями власного навчання та необхідності брати на себе відповідальність за його результати;

в) допомагають учням здійснювати та розуміти власний внесок у спільноту.

Рекомендується така циклограма використання майндмеппінгу у процесі розв'язання пізнавальних завдань (рис. 11).



Рис. 11. Циклограма використання майндмеппінгу

Подану циклограму можна застосовувати на будь-якому уроці біології чи хімії поряд зі складними обчисленнями, практичними заняттями чи проєктною діяльністю. Вона допомагає учням системно та стратегічно підходити до вирішення складних проблем. Такий підхід дає учням змогу засвоювати предметні знання та розбивати пізнавальні завдання на частини, щоб знизити когнітивне навантаження.

ВИСНОВКИ

Майндмеппінг – потужний інструмент, що допомагає учням осмислювати складний навчальний матеріал. Створюючи ментальні карти, учні не просто копіюють факти, а активно впорядковують ідеї, установлюють взаємозв'язки та глибше й креативніше опрацьовують інформацію. Цей метод надає учням можливості для дослідження причин, наслідків і можливих засобів вирішення проблем, перетворюючи абстрактні питання на можливості для творчого мислення та змістовних дискусій. Попереднє планування та впорядкування матеріалу за допомогою ментальних карт слугує своєрідною «дорожньою картою», що позитивно впливає на розвиток когнітивних стратегій учня.

Розвиток когнітивних навичок має здійснюватися з урахуванням індивідуальних особливостей учнів та конкретного навчального контексту, що дасть учням змогу опанувати стратегії, необхідні для успіху у вивченні біології та хімії. Установлено, що когнітивна стратегія учня має обов'язково включати такі етапи: пізнання процесу, виділення його структури, проєктування конкретних способів діяльності, побудова індивідуальної стратегії, перевірка стратегії та її презентація.

У результаті емпіричного дослідження було з'ясовано, що найбільший вплив застосування майндмеппінгу здійснює на стратегії, пов'язані зі згортанням навчальної інформації, зокрема аналіз рисунків, графіків та розуміння хімічних формул. Результати проведеного дослідження констатують, що застосування майндмеппінгу у навчальному процесі з біології та хімії дає змогу забезпечувати варіативність у здатності школяра пізнавати навколишній світ, стає запорукою для розкриття його індивідуальних особливостей та створення умов для розроблення власної когнітивної стратегії. Установлено, що на розвиток когнітивних стратегій учнів найбільше впливає поєднання майндмеппінгу з елементами сучасних інноваційних технологій, зокрема проблемно-орієнтованого, інтегративного та проєктного навчання. Для отримання позитивного ефекту необхідні також цілеспрямована підтримка педагога, його обізнаність з індивідуальними особливостями когнітивної сфери кожного учня.

АНОТАЦІЯ

Виходячи з основних положень Концепції «Нова українська школа», основний акцент у закладі загальної середньої освіти має полягати у формуванні в учнів природничо-наукової компетентності засобами засвоєння системи інтегрованих знань про довкілля, застосування знань із біології та хімії у повсякденному житті, оцінюванні їхньої ролі для сталого розвитку людства. В умовах значних утрат навчального часу, зумовленого об'єктивними чинниками, основним завданням педагога стає розвиток когнітивної сфери школяра, зокрема розвиток його пізнавальних стратегій. Формування когнітивної стратегії робить більш швидким отримання результату за рахунок скорочення кількості хибних дій, а також зменшення зовнішнього навантаження на пам'ять. Технологія майндмепппінгу є універсальним та широким інструментом, що забезпечує розвиток когнітивної сфери учня. Вона сприяє процесу когнітивного залучення учня до процесу пізнання, що позитивно впливає на розвиток його критичного мислення та готовність виконувати пізнавальні завдання. Ментальна карта також надає можливість побудови власної пізнавальної стратегії та дає змогу візуалізувати сутність проблеми, насамперед тоді, коли вона носить абстрактний характер. Найширший простір на навчальних заняттях із біології та хімії майндмеппінг надає у процесі розгляду проблем, пов'язаних із вивченням концептуальних законів та теорій, що позитивно впливає на формування наукового світогляду. Майндмеппінг також створює сприятливі умови для самоаналізу учнем результатів власної діяльності.

Література

1. Matook S., Wang Y. M., Koeppel N., Guerin S. Metacognitive skills in low-code app development: Work-integrated learning in information systems development. *Journal of Information Technology.* 2023. Vol. 39. № 1. P. 41–70. DOI: https://doi.org/10.1177/02683962231170238

2. Paige V. Mind Mapping: Making connections with Images and colour. *Delta Journal of eduction.* 2017. № 2. P. 1–10.

3. Авдєєва О. Ю. Формування гностичних умінь учнів із хімії як педагогічна проблема. *Наукове забезпечення технологічного процесу XXI сторіччя.* Чернівці, 2020. Т. 4. С. 86.

4. Б'юзен Т. Мапа думок. Львів : Видавництво Старого Лева, 2021. 224 с.

5. Дещенко О. М. Когнітивні стратегії розв'язання нестандартних конструкторських задач у процесі технічної творчості старшокласників. *Педагогічна академія: Наукові записки.* 2026. № 29. DOI: https://doi.org/10.5281/ zenodo.19468220

6. Лавренова М. В. Ментальні карти як новації в освітньому просторі. *Науковий вісник Мукачівського державного університету. Серія «Педагогіка та психологія».* 2019. Вип. 1(9). С. 36–39. DOI: 10.31339/2413-3329-2019-1(9)-36-40

7. Оксентюк Н. В. Можливості застосування ментальних карт у навчальному процесі. *Технології навчання.* 2015. Вип. 15. С. 194–208.

8. Позднякова Т. Є. Візуалізація та структурування інформації за допомогою ментальних карт на уроках біології : науково-методичний посібник. Рівне : РОІППО, 2018. 50 с.

Information about the author:
Hirya Oleksiy,
Candidate of Pedagogical Sciences,
Associate Professor at the Department of Pedagogy,
Special Education, and Management
Sumy Regional Institute of Postgraduate Pedagogical Education
5, Mykola Sumtsov Street, Sumy, Ukraine

CHAPTER 39

RESEARCH ON THE FEATURES OF TEACHING NATURAL SCIENCES IN DISTANCE LEARNING

Diuzhykova Tetiana, Chetvertak Tetiana, Barus Marianna
DOI https://doi.org/10.30525/978-9934-26-714-7-39

INTRODUCTION

The modern development of education is closely related to the widespread use of digital technologies. This became especially noticeable during the pandemic and martial law, when schools were forced to switch to distance learning. In such circumstances, the question of high-quality organization of teaching arose, in particular, natural science subjects, which usually involve practical work[1].

Physics, chemistry, biology and geography form scientific thinking and research skills in schoolchildren. However, these subjects require laboratory classes, which are difficult to organize remotely, which creates a number of pedagogical, methodological and technical difficulties.

At the same time, the distance format opens up new opportunities – interactive platforms, virtual laboratories, multimedia and digital tools. This requires new approaches from the teacher, adaptation of materials, development of digital skills and the ability to maintain student motivation[2].

The relevance of the work is due to the need to study the specifics of distance teaching of natural sciences, to identify effective teaching methods and to develop recommendations for improving its quality.

Students' understanding of science is an important prerequisite for learning in schools, for example, as a basis for a high degree of independence in research-based learning, as well as an educational goal that allows students, among other things, to critically evaluate information.

Empirical research in education has always focused on the characteristics that make up good teaching. Over the past century, the field has undergone

[1] Державний стандарт базової середньої освіти. Затверджено постановою Кабінету Міністрів України від 30 вересня 2020 р. № 898. https://mon.gov.ua/osvita-2/zagalna-serednya-osvita/nova-ukrainska-shkola-2/derzhavniy-standart-bazovoi-serednoi-osviti (дата звернення: 05.04.2026).

[2] Биков В. Ю. Дистанційне навчання: теорія і практика : монографія. Київ : Юрінком Інтер, 2008. 352 с.

a paradigm shift. For much of the 20th century, high-quality teaching was characterized by a teacher-centered approach. Educational research has also focused on the corresponding qualities that good teachers should possess. Since the 1970s, a shift towards learner-centered teaching has begun. This has been due to increasingly vocal voices in education and educational research demanding that learners, as subjects, be at the center of teaching and learning. As teaching methods have shifted towards a more learner-centered approach over the past decades, the concept of learner-centeredness has become established in pedagogy and didactics. It has become apparent that it is a conceptually vague construct, described under different names in different models. Research in school practice largely agrees that student-centeredness is now one of the central principles on which teaching is based[3].

Contemporary considerations regarding the design of effective higher education increasingly focus on the choice of an appropriate learning format, that is, on how and to what extent learning should (continue to) take place digitally.

The goal is to investigate the features of teaching natural sciences in distance learning and to identify effective approaches to organizing this process.

Tasks:

- analyze the essence of distance learning;
- characterize the specifics of natural sciences;
- identify appropriate methods and technologies;
- investigate the organization of practical and laboratory work;
- identify key problems and propose ways to solve them.

The object of research is the process of teaching natural sciences in educational institutions.

Methods used: literature analysis, generalization of experience, comparison, systematization and observation.

Practical value of the work – the results obtained can be used by teachers to increase the effectiveness of distance learning.

1. Theoretical basis of teaching natural disciplines

1.1. The concept and structure of natural disciplines

Natural sciences occupy an important place in school education, as they help students form a scientific understanding of the world, natural phenomena and the role of man in nature. The main ones are physics, chemistry, biology and geography – each of which has its own subject of study, but together they create a holistic picture of the world around us.

[3] Кухаренко В. М., Рибалко О. В., Сиротенко Н. Г. Дистанційне навчання: умови застосування. Харків : НТУ «ХПІ», 2002. 320 с.

Physics studies the movement, interaction of matter and energy, is a fundamental science and the basis of modern technologies. Without physical knowledge, it is impossible to understand the principles of electronics, transport, energy and space exploration. Physics develops logical and abstract thinking in students, the ability to model situations and solve non-standard problems[4].

Chemistry studies the composition, structure, properties of substances and their transformations. Its achievements are actively used in industry, medicine, agriculture and everyday life. The study of chemistry forms in students an understanding of the material world, develops a caring attitude towards the environment and safe behavior in everyday life.

Biology is the science of living organisms, their structure, development and interaction with the environment. It covers a wide range of areas: from molecular genetics to the ecology of entire ecosystems. Biology educates environmental responsibility, promotes awareness of the value of health and forms a culture of sustainable environmental management.

Geography studies natural and socio-economic processes on Earth, forming an idea of the climate, natural resources, population and economy. It develops spatial thinking, teaches to analyze maps, statistical data and navigate in modern geopolitical processes.

An important feature of these subjects is their interconnectedness and integrated nature: biological processes cannot be understood without chemistry, geographical phenomena are often explained through physical laws, and environmental problems require knowledge from all natural disciplines at the same time. That is why integrated learning – the STEM approach, which combines natural sciences, technology, engineering and mathematics – is becoming increasingly widespread in modern education.

Teaching natural sciences has its own characteristics: it is based on experiment and observation, uses visualization and models, forms research skills and teaches how to apply knowledge in practice. Modern teaching methods also involve the use of digital tools – virtual laboratories, interactive simulations and educational platforms, which significantly expands the possibilities of cognition.

Therefore, natural science disciplines perform not only cognitive, but also developmental and educational functions, preparing students for conscious life in a technological society and contributing to the formation of a comprehensively developed personality.

[4] Міністерство освіти і науки України. Офіційний сайт. URL: https://mon.gov.ua (дата звернення: 05.04.2026).

1.2. The essence of distance learning

Distance learning is a modern form of education based on the use of digital technologies and involves the interaction of teachers and students at a distance.

Its main feature is the lack of direct contact between participants in the educational process, which is compensated by video conferences, electronic platforms, online resources and educational applications.

There are three main forms of distance learning. Synchronous involves communication between teachers and students in real time – through online lessons and video conferences. Asynchronous allows you to work on materials and complete tasks at a convenient time without the simultaneous presence of all participants. Mixed combines traditional classroom lessons with online and independent forms of work[5].

Among the advantages of distance learning are: flexibility in choosing time and place, wide access to information resources, the ability to individualize the learning process and the use of modern technologies.

However, there are also significant disadvantages: limited live communication between the teacher and students, difficulties in organizing practical classes, the need for high self-discipline, as well as technical problems associated with the Internet and equipment.

Therefore, distance learning can be effective if there is a competent combination of appropriate methods, tools and technologies.

1.3. Psychological and pedagogical features of distance learning

The organization of distance learning requires taking into account how students perceive information, how motivated they are and how capable they are of independent work.

One of the main changes is the nature of the interaction between the teacher and students. In the distance format, live emotional communication fades into the background, which can reduce the interest and activity of students. Therefore, it is important for the teacher to create a comfortable psychological atmosphere even in virtual space.

A serious problem remains the decline in learning motivation. Students often experience difficulties in organizing their own activities, which negatively affects learning outcomes. Interactive methods, involving students in active work and various forms of feedback help to overcome this.

At the same time, distance learning also has a positive impact – it develops independence, responsibility, self-control skills, planning and working with information.

---

[5] Морзе Н. В., Кочарян А. Б. Інформаційно-комунікаційні технології в освіті : навчальний посібник. Київ : Академвидав, 2014. 302 с.

Other psychological and pedagogical features of this format include: the need for a clear structure of educational material, active use of visual and multimedia tools, taking into account the individual characteristics of each student and ensuring regular feedback[6].

The issue of assessing knowledge deserves special attention. In conditions of distance learning, it is more difficult to achieve objectivity, therefore it is advisable to combine various forms of control – testing, project work, oral answers and creative tasks.

Therefore, the effectiveness of distance learning is largely determined by the extent to which the teacher takes into account the psychological and pedagogical characteristics of students and possesses the appropriate professional skills.

2. Features of teaching natural disciplines in distance learning

2.1. Features of natural disciplines (biology, chemistry, physics, geography) as academic subjects

Natural disciplines differ from humanitarian and social subjects in several key features:

1. Experimental component – most topics involve practical application of knowledge through laboratory work, experiments and observations.

2. Visualization of processes and phenomena – to master the material, students need to see the dynamics of processes, the structure of organisms, chemical reactions or physical phenomena.

3. Mathematical apparatus and accuracy of measurements – physics and chemistry require calculations, calculations and the use of formulas, which adds complexity to online learning.

4. Interdisciplinarity – geography, biology and chemistry are often integrated with ecology, technology and mathematics, which creates the need for an integrated approach.

5. Dependence on material resources – working with laboratory equipment, chemical reagents, microscopes and other devices requires physical presence, which complicates distance learning.

Thus, natural sciences have specific methodological requirements that must be taken into account when organizing online lessons.

2.2. Adaptation of curricula and content to the distance format

Adaptation involves changing the structure, methods and forms of presentation of educational material for effective learning in an online environment:

[6] Положення про дистанційне навчання : Наказ Міністерства освіти і науки України від 25.04.2013 № 466 (зі змінами).

• Reduction or modification of the experimental component through the use of multimedia resources: presentations, graphs, 3D models, educational videos, interactive maps.

• Step-by-step structuring of the material: division into blocks with theoretical explanations, examples, interactive tasks and self-testing.

• Integration with online platforms (Google Classroom, Moodle, Kahoot, LearningApps) for organizing tasks, tests and discussions.

• Differentiation of tasks: adaptation of the complexity of the material according to the level of training of students, which allows for an individual approach in a distance format.

• The use of video demonstrations, interactive simulations and virtual laboratories.

Such measures ensure the preservation of the content of the discipline and allow for the preservation of interactivity of learning even without physical presence.

2.3. Organization of practical and laboratory work in distance learning conditions

Organization of practical work in natural sciences is one of the most difficult tasks of distance learning. Several approaches are used to solve it.

Virtual laboratories are online services that simulate real experiments without physical risks. Among the most common: PhET Interactive Simulations (simulations in physics, chemistry and biology), ChemCollective (virtual chemical laboratory), Labster (interactive 3D laboratories in biology, chemistry and medicine), ExploreLearning Gizmos (models for natural sciences) and Bioman Biology (interactive biological experiments).

Video demonstrations – a teacher or scientist conducts an experiment on camera, and students observe, analyze the results and complete the tasks. For this, resources such as Khan Academy, Crash Course on You Tube or Ukrainian educational platforms with video lessons in natural sciences are used.

Home experiments are simple experiments with safe materials under the online guidance of a teacher. For example, observing plant growth, studying chemical reactions by mixing safe solutions or measuring the speed of falling bodies.

Interactive simulations and modeling are digital tools that allow you to recreate the conditions of an experiment and change its parameters. Additionally, Molecular Workbench, Visible Body, Algodoo (for physics) and EarthViewer (for geography and ecology) are used.

Group projects and research tasks are joint work of students on data collection and analysis, discussion of results via video call or forums. Google Workspace, Padlet, Miro and Jamboard are used to organize cooperation.

The integrated use of these methods allows you to maintain the practical component of learning and form scientific research skills in students even in a distance format.

2.4. Formation of natural science competence of students online

Natural science competence includes the ability to analyze and interpret natural phenomena, apply knowledge in practice, conduct experimental research and work with scientific information.

In the conditions of online learning, its formation is ensured through several key approaches.

Interactive tasks and testing stimulate critical thinking and the ability to make independent decisions, encouraging students to actively process the material.

Project activities involve the development of experiments, observations, reports and scientific presentations in digital format, which develops research skills and the ability to structure the results of work.

Digital models and simulations allow you to test hypotheses and explore processes that are difficult or impossible to observe in real conditions.

Group discussions and forums develop communication skills, teach you how to argue your own position and defend scientific conclusions.

An interdisciplinary approach ensures the integration of knowledge from different natural sciences, which contributes to a deeper and more comprehensive understanding of phenomena and processes.

Therefore, the distance format is not an obstacle to the effective formation of natural science competence – provided that interactive methods, digital tools and scientific research activities are competently combined[7].

3. Practical aspects and recommendations

3.1. Analysis of the experience of teaching natural sciences in a mixed format

Modern realities of school functioning require the organization of the educational process in a mixed format, combining face-to-face and distance learning. This approach ensures continuity of education, flexibility in teaching and the ability to adapt to different circumstances, including security ones.

In practice, teaching natural sciences is built on a combination of these two forms. Face-to-face classes are used mainly to explain complex topics, conduct laboratory work and directly communicate with students. The distance

[7] Пометун О. І., Пироженко Л. В. Сучасний урок. *Інтерактивні технології навчання* : науково-методичний посібник. Київ : А.С.К., 2004. 192 с.

component covers consolidating the material, completing independent tasks and monitoring results.

To organize online learning, Google Classroom is used – for posting materials, tasks and assessments – and Meet for conducting lessons and consultations.

The work pays special attention to the use of multimedia materials, the combination of individual, group and project activities, as well as ensuring constant feedback with students. The blended format has proven effective for several reasons: face-to-face classes compensate for the limitations of distance learning, the online component expands access to educational resources, and in general, the individualization of the educational process is ensured.

However, certain difficulties were also revealed: uneven student activity during distance learning, difficulty synchronizing material between formats, and significant time spent preparing educational materials.

Despite these challenges, the blended learning format has confirmed its feasibility and effectiveness in teaching science subjects.

3.2. Results of pedagogical observation and questionnaires of teachers and students (empirical part)

To determine the effectiveness of distance learning of science subjects, pedagogical observation and questionnaires were conducted among teachers and students.

Research methodology:

Methods: questionnaires, pedagogical observation during online lessons, analysis of tasks completed by students.

Sample: 4 teachers of science subjects (biology, chemistry, physics, geography); 31 8th grade students.

Tools: online questionnaire for teachers and a separate questionnaire for students, observations during Google Meet lessons, analysis of the results of laboratory and practical tasks.

Student survey results:

Clarity of theoretical material:

74% of students noted that online lessons explain the material well;

19% – partially clear;

7% – difficult to understand.

Online practical and laboratory tasks:

61% of students believe that video demonstrations and simulations help to understand the experiment;

26% – partially help;

13% – difficult to perform without visual equipment.

Motivation for learning:

68% of students feel interested during interactive tasks;

32% – sometimes lose motivation.

Resources used:

PhET – 42% of students;

Labster – 19%;

Kahoot / Quizizz – 61%;

LearningApps – 55%;

YouTube video lessons (Khan Academy, CrashCourse) – 48%.

Results of the teacher survey (4 respondents):

Evaluation of the effectiveness of distance learning:

Theory: 3 teachers-effective, 1 – partially effective;

Practice/laboratory work: 2 – partially effective, 2 – effective if virtual laboratories are used.

Problems with distance learning:

limited access of students to fast Internet – 3/4;

complexity of organizing laboratory work – 4/4;

insufficient digital competence of students – 2/4;

uneven motivation of students – 3/4.

Tools and methods that increase efficiency:

Virtual labs (PhET, Labster, ChemCollective) – 4/4;

Online tests and quizzes (Kahoot, Quizizz) – 3/4;

Simulations and modeling – 3/4;

Home safe experiments – 2/4;

Project activities and group assignments – 3/4.

Conclusions: Distance learning of natural sciences for 8th grade students is effective when using interactive methods, virtual laboratories and video demonstrations.

Main problems: difficulty in conducting laboratory work without visual equipment, unequal access to digital resources and the Internet, partial loss of student motivation.

The use of various digital tools (simulations, tests, videos) has a positive effect on understanding the material and the development of natural science competence.

3.3. Methodological recommendations for the effective organization of distance learning in natural sciences

Based on the analysis of experience and empirical data, the following recommendations are offered:

1. Apply a blended learning format: online theory + face-to-face or virtual laboratory work.

2. Use interactive services and simulations:

• PhET, Labster, ChemCollective – laboratory experiments;

• LearningApps, Kahoot – knowledge testing;

• Google Forms, Classtime – results control and testing.

3. Develop step-by-step instructions for home experiments with safe materials.

4. Support student communication and collaboration through group chats, forums, video conferences and project activities.

5. Provide differentiation of tasks: separate tasks for students with different levels of training and digital skills.

6. Constant feedback: comments, assessments, explanations of errors for the formation of natural science competence.

7. Improving the digital literacy of students and teachers, including training in working with online laboratories and services for interactive learning.

Following these recommendations allows you to increase the effectiveness of distance teaching of natural sciences, preserve their practical component, and ensure the development of students' scientific thinking.

CONCLUSIONS

A comprehensive study of the features of teaching natural sciences in distance and blended learning was carried out.

The analysis showed that natural sciences play an important role in shaping students' scientific worldview, developing their logical thinking and practical skills. In conditions of distance and blended learning, there is a need to transform traditional approaches to teaching, taking into account modern educational challenges. It was established that the effectiveness of the educational process largely depends on the use of interactive methods, digital platforms, multimedia resources, as well as on a rational combination of face-to-face and distance learning. Video lectures, simulations and virtual laboratories play a special role, which partially compensate for the limitations of students' practical activities. As a result of the study, practical recommendations were also developed for teachers on the effective organization of teaching natural sciences in distance and blended learning formats.

The purpose of the study, which was to study the features of teaching natural sciences in distance and blended learning, was achieved. In the process of work, all the tasks were completed: the theoretical foundations of teaching natural sciences were analyzed, the essence and forms of distance learning were considered, the main methods and technologies of teaching were determined, the

features of the organization of practical and laboratory work were investigated, key problems were identified and ways to solve them were proposed. The practical part of the work, based on my own pedagogical experience, confirmed the feasibility of using a blended learning format as an effective model of organizing the educational process. The developed recommendations for teachers complement the theoretical provisions and have practical value.

Prospects for further scientific research lie in an in-depth study of the possibilities of improving blended learning, in particular in the aspects of increasing student motivation, developing their research competencies, and providing quality feedback. The development of new digital tools and methods for conducting practical and laboratory work in a distance format is also relevant. The issue of objective assessment of student academic achievements and the impact of digital technologies on the quality of education in general requires further research.

SUMMARY

Therefore, the results of the study confirm that the introduction of modern pedagogical approaches and digital technologies in teaching natural sciences contributes to increasing the efficiency of the educational process and ensures its adaptation to the conditions of blended learning.

Bibliography

1. Державний стандарт базової середньої освіти. Затверджено постановою Кабінету Міністрів України від 30 вересня 2020 р. № 898. https://mon.gov.ua/osvita-2/zagalna-serednya-osvita/nova-ukrainska-shkola-2/derzhavniy-standart-bazovoi-serednoi-osviti (дата звернення: 05.04.2026).

2. Биков В. Ю. Дистанційне навчання: теорія і практика : монографія. Київ : Юрінком Інтер, 2008. 352 с.

3. Кухаренко В. М., Рибалко О. В., Сиротенко Н. Г. Дистанційне навчання: умови застосування. Харків : НТУ «ХПІ», 2002. 320 с.

4. Міністерство освіти і науки України. Офіційний сайт. URL: https://mon.gov.ua (дата звернення: 05.04.2026).

5. Морзе Н. В., Кочарян А. Б. Інформаційно-комунікаційні технології в освіті : навчальний посібник. Київ : Академвидав, 2014. 302 с.

6. Положення про дистанційне навчання : Наказ Міністерства освіти і науки України від 25.04.2013 № 466 (зі змінами).

7. Пометун О. І., Пироженко Л. В. Сучасний урок. *Інтерактивні технології навчання* : науково-методичний посібник. Київ : А.С.К., 2004. 192 с.

Information about the authors:
Diuzhykova Tetiana,
Candidate of Pedagogical Sciences, Associate Professor,
Head of the Depatment of Chemistry and Chemical Education
Bogdan Khmelnitsky Melitopol State Pedagogical University
59, Naukovoho mistechka Street, Zaporizhia, Ukraine

Chetvertak Tetiana,
Candidate of Pedagogical Sciences,
Associate Professor at the Department of Chemistry
and Chemical Education
Bogdan Khmelnitsky Melitopol State Pedagogical University
59, Naukovoho mistechka Street, Zaporizhia, Ukraine

Barus Marianna,
Candidate of Chemical Sciences,
Associate Professor at the Department of Chemistry
and Chemical Education
Bogdan Khmelnitsky Melitopol State Pedagogical University
59, Naukovoho mistechka Street, Zaporizhia, Ukraine

CHAPTER 40

РЕЗУЛЬТАТИ ВИВЧЕННЯ ГІДРОГЕОЛОГІЧНОГО ТА ГЕОДИНАМІЧНОГО СТАНІВ В ЕКОЛОГІЧНО НЕБЕЗПЕЧНИХ РЕГІОНАХ ТА ЇХ ВИКОРИСТАННЯ ПРИ ВИВЧЕННІ ПРИРОДНИЧИХ ДИСЦИПЛІН

Ігнатишин Василь
DOI https://doi.org/10.30525/978-9934-26-714-7-40

ВСТУП

Природничі дисципліни відіграють важливу роль у загальноосвітньому процесі, зокрема знання з географії, фізики, біології, природознавства, хімії, екології є важливими у формуванні світогляду сучасної молоді.

Для вивчення предметів природничого спрямування, зокрема географії, фізики, екології, важливе застосування сучасних педагогічних методик і технологій, досягнень сучасної науки та техніки. Важливість використання нових засобів у викладанні природничих наук полягає у створенні інноваційних напрямів для досягнення поставлених педагогічних завдань. Проводиться пошук підвищення ефективності викладання цих предметів згідно з основними напрямами програм природничих наук. У розділі представлено приклад проведення та використання досліджень географічних процесів у регіоні в навчально-виховному процесі, зокрема під час проведення занять гуртків позашкільної освіти з географії, гідрології, екології, фізики. **Метою роботи** є представлення алгоритму вивчення проблем екологічного стану Закарпаття на основі моніторингу природних процесів, використання результатів цих досліджень у навчально-виховному процесі під час вивчення предметів природничого спрямування**. Об'єкт дослідження** в розділі – географічні процеси, гідрологічний стан регіону, сейсмічний стан регіону та геодинамічний стан регіону; педагогічні аспекти вивчення природних явищ. **Предметом дослідження є** сучасні горизонтальні рухи кори в зоні Оашського глибинного розлому, сейсмічний стан Карпатського регіону, варіації параметрів гідрологічного стану центральної частини Закарпатського внутрішнього прогину, методичні аспекти використання отриманих результатів досліджень у навчально-виховному процесі загальноосвітньої школи та підготовки учнями

науково-дослідницьких робіт на різноманітні конкурси із природничих наук. **Методика дослідження** полягає в аналізі наукової літератури згідно з тематикою роботи; метод аналізу синтезу, кореляційний аналіз, графічні методи. Для досягнення поставленої мети було використано результати режимних геофізичних, геодинамічних, гідрологічних спостережень у Закарпатському внутрішньому прогині, проведених на пунктах режимних геофізичних спостережень, на пунктах деформометричних спостережень Карпатської дослідно-методичної геофізичної та сейсмологічної партії відділу сейсмічності Карпатського регіону Інституту геофізики імені С. І. Субботіна НАН України за 2024 рік.

1. Деякі особливості базової географічної освіти на сучасному етапі та перспективи її розвитку

Д. Мальчикова та К. Мезенцев зазначають, що аналіз трансформації стандартів базової географічної освіти в Україні й зарубіжних країнах та їхнього впливу на формування публічного іміджу географії у XXI ст. засвідчує суттєві відмінності в суспільному сприйнятті географії як науки, освітньої галузі та сфери кар'єрних можливостей. Упровадження в освітній процес таких підходів до навчання, що стимулюватимуть зацікавленість актуальними місцевими, регіональними, міжнародними проблемами, створює фундамент ухвалення рішень на основі розуміння геопростору та взаємозв'язків у ньому[1]. Л. Руденко та співавтори запропонували шляхи подолання кризи в освітянській і науковій сферах України, зокрема перехід на Європейську систему викладання в закладах вищої освіти, посилення ролі та значення вивчення географії в середній школі як предмета, що формує світоглядне системне мислення в молодого покоління[2]. А. Сергеєва та співавтори зазначили, що одним із найважливіших завдань, що вирішуються у процесі модернізації шкільної географічної освіти, є інтеграція знань учнів про природу та суспільство. У сучасних умовах рекомендується приділяти особливу увагу регіонально-географічній складовій частині змісту та реалізації комплексного регіонально-географічного підходу. Раніше зміст шкільної географії в Казахстані розглядався на основі всебічного й комплексного країнознавства. Нині країнознавча освіта у школі має соціально-економічний і геополітичний характер. Нова навчальна програма для учнів має виражений акцент на

[1] Мальчикова Д., Мезенцев К. Публічний імідж географії в контексті трансформації стандартів базової середньої освіти: досвід України і світу. *Український географічний журнал.* 2022. № 1. С. 53–63. URL: https://ukrgeojournal.org.ua/sites/default/files/UGJ-1-2022_53-63.pdf

[2] Руденко Л., Заячук М., Лісовський С., Маруняк Є., Муніч Н., Пересадько В., Пономаренко О. Військова агресія Росії в Україні та її наслідки для географічної освіти і науки. *Український географічний журнал.* 2022. № 4. С. 4–12. [Англійською мовою]. DOI: 10.15407/ugz2022.04.004.4

математичне моделювання та дослідницьку діяльність[3]. А. Дронова та співавтори показали, що географічна наука недостатньою мірою відповідає сучасним запитам суспільства на географічні відомості та географічні знання. Реформування вітчизняної науки й освіти ставить перед географами низку нових проблем, а новітня інформаційно-технологічна революція поряд із новими технічними можливостями позначає все нові, більш складні запити на географічну інформацію. У країнах ЄС географія відіграє необхідну роль у розробленні планів організації, бізнес-моделей у таких сферах, як регіональний і місцевий розвиток, планування та розвиток міст і громад, управління ризиками надзвичайних ситуацій[4].

2. Аналіз публікацій із висвітлення проблем геодинамічних сейсмологічних і географічних процесів у регіоні

Проведено огляд публікацій щодо зв'язку географічних процесів з екологічними проблемами. А. Семергей-Чумаченко та Р. Озимко зазначили, що проблема глобальних кліматичних змін не тільки стосується питання потепління, а й охоплює тенденції нерівномірного випадання опадів і, відповідно, збільшення частоти й екстремальності стихійних метеорологічних явищ, серед яких – сильні опади та зливи[5]. О. Скриник і співавтори показали, що локальні фізико-географічні особливості місцевості мають деякий вплив на її клімат, існують статистично значущі кореляційні зв'язки між фізико-географічними характеристиками місцевості, як, наприклад, абсолютна висота над рівнем моря, експозиція схилів гірських масивів, відстань до берегової лінії, географічні координати (широта та довгота), та кліматологічними величинами[6]. Важливо мати інформацію про сейсмотектонічні процеси в регіоні, які є визначальними у формуванні екологічного стану регіону. Д. Малицький та співавтори запропонували методику, що дозволяє визначити вогнищевий механізм землетрусу за допомогою даних невеликої кількості станцій, особливо в регіонах з відносно низьким рівнем локальної сейсмічної активності, до

[3] Сергєєва А. Єсембек С., Абдулліна А., Баубекова Г. Аналіз змісту розділу «Країнознавство» оновленої шкільної навчальної програми з географії в Казахстані. *Український географічний журнал.*2023. № 2. С. 60–70. [Англійською мовою]. DOI: 10.15407/ugz2023.02.060

[4] Дронова О., Маруняк Є., Руденко Л., Топчієв О. Імідж і місія географічної науки в Україні. *Український географічний журнал.* 2023. № 3. С. 3–11. [Українською мовою].

[5] Семергей-Чумаченко А., Озимко Р. Сильні дощі та зливи в Закарпатській області як стихійні метеорологічні явища (1999–2018 роки). *Український географічний журнал.* 2019. № 4. С. 11–17. URL: https://ukrgeojournal.org.ua/sites/default/files/UGJ-2019-4_11-17.pdf

[6] Скриник О., Осадчий В., Сзентімрей Т., Біхарі З., Сіденко В., Ошурок Д., Бойчук Д., Скриник О. Просторова інтерполяція кліматологічних даних з урахуванням топографічних та фізико-географічних особливостей території України. *Український географічний журнал.* 2020. № 2. С. 13–19. URL: https://ukrgeojournal.org.ua/sites/default/files/UGJ-2-2020_13-19.pdf

яких належить Передкарпаття. Визначено механізм землетрусу поблизу Стебника 29 вересня 2017 року, порівняно механізм з даними геологічної будови регіону, що дозволило встановити ймовірні тектонічні передумови землетрусу та пов'язати його зі зсувом поблизу міста Стебник[7]. В. Семенов зі співавторами показали результати електромагнітного моніторингу, проведеного поблизу сейсмічно активних регіонів, згідно з теоретичними викладками, деякі явища мають глобальне походження. Для дослідження використано звичайні магнітотелуричні дані, записані на середніх широтах, розташованих досить далеко від сейсмічно активних регіонів, та встановлено, що між сейсмічними й електромагнітними подіями з високою імовірністю існує глобальний зв'язок[8]. О. Марченко та співавтори обчислили компоненти тензора швидкості деформації, швидкості дилатації та компоненти тензора швидкості зсуву в регіоні, побудували модель тензора швидкості обертання, що підтвердило факт: регіон дослідження варто інтерпретувати як деформовану територію. За результатами обчислень з моделі GNSS-даних компонент горизонтальних деформацій було знайдено швидкості головних значень та швидкості головних осей деформації земної кори; основні тектонічні утворення показані як фонова інтенсивність різних компонент швидкостей, тензорів швидкості обертання та швидкості деформації[9]. Є. Гопченко та співавтори встановили, що тема гідрологічних впливів на екологічний стан визначається в основному двома факторами: перший більш статистично можливий – це екологічні негаразди метеорологічного характеру, пов'язаного з атмосферними опадами, які супроводжуються підняттями рівня води в річках, зокрема в Закарпатті, що можуть призвести до значних економічних збитків. Другий – це фактор впливу на геодинамічний стан і сейсмічність регіону. В умовах сучасних змін клімату на Землі суттєво підвищується імовірність настання екстремальних гідрологічних явищ, зокрема катастрофічних паводків різного походження. Вивчення розподілу територією України катастрофічних паводків і водопіль показало, що переважна кількість руйнівних паводків припадає на найбільш паводконебезпечний район – Українські Карпати, де паводки є характерною рисою гідрологічного

[7] Малицький Д., Гнип А., Грицай О., Муровська А., Кравець С., Козловський Є. Механізм виникнення та тектонічна обстановка землетрусу 29.09.2017 поблизу Стебника. *Геодинаміка.* 2018. № 1 (24). С. 100–110. DOI: 10.23939/jgd2018.01.100

[8] Семенов В., Ладанівський Б., Петрищев М. Виникнення сліду землетрусів у варіаціях природного електромагнітного поля. *Геодинаміка*. 2018. № 2925. С. 65–70. DOI: 10.23939/jgd2018.02.065

[9] Марченко О., Перій С., Ломпас О., Голубінка Ю. Марченко Д., Крамаренко С., Абдулвасіу Салаву. Визначення тензора горизонтальних швидкостей деформацій у Західній Україні. *Геодинаміка*. 2019. № 2 (27). С. 5–15. DOI: 10.23939/jgd2019.02.005

режиму річок[10]. О. Чалий зі співавторами показали, що землетрус, що стався біля м. Суми (3 лютого 2015 р.), зумовлений впливом декількох напружених режимів, пов'язаних на регіональному рівні з перенесенням напруг із зони Вранча вздовж мантійного лінеамента Соллогуба, зміною локального поля напруги, яке створюється різними за товщиною земної кори блоками за наявності підкорових теплових аномалій і аномалій щільності. Встановлено, що нижня частина кори, для якої характерний розвиток коро-мантійної суміші, земна кора області має яскраво виражену фізико-геологічну неоднорідність, що створює нестабільність літостатичного тиску та є передумовою появи додаткових напружень[11]. О. Кошляков і співавтори зазначили, що актуальність дослідження впливу підземних вод на стійкість укосів і схилів зумовлена тенденцією збільшення частоти проявів екзогенних геологічних процесів унаслідок техногенного впливу, оскільки своєчасне виявлення небезпечних ділянок і застосування заходів з метою запобігання розвитку зсувних процесів дозволить уникнути значних збитків[12]. В. Зацерковний і М. Богословський показали, що аналіз ризику виникнення і розвитку природно-техногенних надзвичайних ситуацій є частиною системного підходу до ухвалення рішень у процесі управління територіями, процедур і практичних заходів у вирішенні завдань управління процесом досягнення безпеки. Основою аналізу є фізичне та математичне моделювання природних і соціально-економічних систем і процесів, що відбуваються в них, яке передбачає взаємодію основних компонентів системи з навколишнім середовищем у штатних і позаштатних ситуаціях[13]. А. Назаревич і співавтори представили методику дослідження і виділення метеорологічних термопружних деформацій із деформографічних даних і результатів виділення, з її застосуванням, малоамплітудних деформаційних аномалій – провісників місцевих закарпатських землетрусів; показали, що вивчення

[10] Гопченко Є., Овчарук В., Шакірзанова Ж., Гопцій М., Траскова А., Швець Н., Сербова З., Тодорова О. Моделювання екстремально високих паводків на прикладі гірських регіонів України. *Вісник Київського національного університету імені Тараса Шевченка. Геологія*. 2018. № 3 (82). С. 6–15. DOI: 10.17721/17282713.82.01

[11] Чалий О., Дяконеску М., Гурова І., Лісовий Ю., Пігулевський П., Щербина С., Шевцов А., Шумлянська Л. Причина активної сейсмічності в Україні. *Вісник Київського національного університету імені Тараса Шевченка. Геологія.* 2018. № 4 (83). С. 38–45. DOI: 10.17721/1728-2713.83.05

[12] Кошляков О., Диняк О., Кошлякова І., Кошлякова Т. Гідрогеологічні особливості розрахунків стійкості укосів і схилів у межах урбанізованих територій. *Вісник Київського національного університету імені Тараса Шевченка. Геологія*. 2018. № 4 (83). С. 79–83. DOI: 10.17721/1728-2713.83.11

[13] Зацерковний В., Богословський М. Розробка моделі функціонального стану об'єкта моніторингу для завдань оцінки ризиків виникнення надзвичайних ситуацій. *Вісник Київського національного університету імені Тараса Шевченка. Геологія*. 2018. № 4 (83). С. 91–97. DOI: 10.17721/1728-2713.83.13

метеорологічних температурних впливів на режимні геофізичні спостереження, розроблення способів урахування таких впливів є одним із важливих завдань під час проведення геодинамічного моніторингу, що є особливо актуальним для деформографічних досліджень[14]. С. Багрій та співавтори зазначають, що для достовірної оцінки напружено-деформованого стану гірських порід, для прогнозування карстових процесів і деформацій, пов'язаних із наявністю видобувних камер і розвитком карсту, можна успішно застосовувати метод природного імпульсного електромагнітного поля Землі (далі – ПІЕМПЗ), розглянуто фізичні передумови застосування методу, викладено основні постулати класифікації аномалій напруженості поля, розроблено підхід для оцінювання глибинності[15]. М. Хом'як та співавтори провели інтерпретацію експериментальних даних (деформаційних, геоакустичних і параметрів вогнища землетрусу) для встановлення їхнього зв'язку із сейсмічністю Закарпатського регіону з використанням статистичного (регресійного) аналізу, описали взаємозв'язки геофізичних параметрів, деформації, геоакустичної емісії та сейсмічних характеристик – магнітуди й енергетичного класу, що дасть можливість зрозуміти, яким чином сейсмічність впливає на зміну тих чи інших параметрів середовища Закарпатського регіону[16]. Є. Углицьких та співавтори представили результати моніторингу деформацій земної поверхні території Закарпаття, виконаного за допомогою методу радарної інтерферометрії, що дозволяє здійснювати моніторинг зміщень земної поверхні в режимі реального часу й оперативно отримувати актуальні дані. Було опрацьовано 26 пар інтерферограм за 2016–2018 роки, побудовано загальну карту вертикальних зміщень земної поверхні полігону, виконано ранжування території на три зони згідно з показниками вертикальних зміщень земної поверхні[17]. Для проведення порівняння та пошуку нових перспектив застосування

[14] Назаревич А., Назаревич Л., Баштевич М. Виділення малоамплітудних деформаційних аномалій-провісників місцевих Закарпатських землетрусів з урахуванням метеотермопружних деформацій. *Вісник Київського національного університету імені Тараса Шевченка. Геологія*. 2019. № 1 (84). С. 21–26. https://doi.org/10.17721/1728-2713.84.03

[15] Багрій С., Кузьменко Е., Дзьоба У. Зв'язок природного імпульсного електромагнітного поля Землі з напруженнями та деформаціями гірських порід на відпрацьованих родовищах солі в Передкарпатті в задачах прогнозування розвитку карсту. *Вісник Київського національного університету імені Тараса Шевченка. Геологія*. 2020. № 2 (89). С. 79–88. https://doi.org/10.17721/1728-2713.89.11

[16] Хом'як М., Малицький Д., Асташкіна О., Махніцький М., Кравець С., Микита А., Грицай О. Регресійний аналіз сейсмічних і геофізичних параметрів та його застосування для дослідження сейсмічності Закарпатського регіону. *Вісник Київського національного університету імені Тараса Шевченка. Геологія*. 2020. № 3 (90). С. 49–53. https://doi.org/10.17721/1728-2713.90.07

[17] Углицьких Є., Вижва С., Іванік О. Моніторинг вертикальних зміщень земної поверхні території Закарпаття за даними радарної інтерферометрії. *Вісник Київського національного університету імені Тараса Шевченка. Геологія.* 2020. № 4 (91). С. 94–99. https://doi.org/10.17721/1728-2713.91.13

геофізичних полів, зокрема електромагнітних явищ у прогнозі землетрусів, у роботі Р. Пирієва було обрано діапазон ультранизьких частот (далі – УНЧ), було побудовано графіки та проведено порівняльний аналіз на основі цих результатів, зроблено висновок, що передвісники УНЧ можуть бути перед землетрусами, що досягають глибин до 30 км, що можна вважати перспективним ефективним діапазоном виявлення передвісників землетрусів[18]. В. Ігнатишин та співавтори представили результати, які важливі для вивчення можливості прояву місцевої сейсмічності в регіоні, розв'язання проблем сейсмонебезпечних територій і майбутнього прогнозу сейсмічних явищ; у роботі проведено дослідження зв'язку динаміки горизонтальних рухів кори в центральній частині Закарпатського внутрішнього прогину та місцевої сейсмічності в періоди інтенсивних атмосферних опадів, досліджено зв'язки варіацій параметрів атмосферних опадів із просторово-часовим розподілом місцевої сейсмічності за 2019–2020 роки, який вказує на високий ступінь кореляції рядів геофізичних даних: підвищення величини кількості опадів супроводжується підвищенням величини кількості зареєстрованих місцевих землетрусів у регіоні, що підтверджує гідрологічний аспект сейсмотектонічних процесів у Закарпатському внутрішньому прогині[19]. О. Іванік і співавтори представили методики локального прогнозування зсувної небезпеки, які на основі застосування раціонального комплексу геологічних, геофізичних, дистанційних, термографічних досліджень, детермінованого моделювання дозволяють виявити головні ознаки, визначити ділянки потенційного розвитку зсувних процесів у межах окремих зсувонебезпечних ділянок і запропонувати комплекс превентивних заходів щодо мінімізації та уникнення їхньої негативної дії[20]. М. Лубков показав традиційний і нестандартний підходи до аналізу розрахункових значень інфільтраційного живлення ґрунтових вод із використанням показника заряду електричного поля приземної атмосфери, а порівняння результатів гідрогеологічних розрахунків і спостережень за специфічними електрофізичними й метеорологічними чинниками дозволяє пояснити невідповідності між

[18] Пирієв Р. Огляд електромагнітних моніторингових досліджень у прогнозі землетрусів: останні результати та нові перспективи. *Вісник Київського національного університету імені Тараса Шевченка. Геологія*. 2022. № 1 (96). С. 40–45. DOI: 10.17721/1728-2713.96.06

[19] Ігнатишин В., Малицький Д., Іжак Т., Ігнатишин М., Ігнатишин А. Моніторинг сейсмотектонічних процесів у Закарпатському внутрішньому прогині за результатами комплексних геофізичних спостережень. *Вісник Київського національного університету імені Тараса Шевченка. Геологія.* 2022. № 3 (98). С. 42–48. DOI: 10.17721/1728-2713.98.05

[20] Іванік О., Шевчук В., Кравченко Д., Гадяцька К. Прогнозування зсувної небезпеки та оцінка впливу на суспільство: головні підходи, принципи, методи. *Вісник Київського національного університету імені Тараса Шевченка. Геологія.* 2023. № 1 (100). С. 5–14. DOI: 10.17721/1728-2713.100.01

значеннями інфільтраційного живлення та кількості опадів[21]. В. Ігнатишин та співавтори провели аналіз просторово-часового розподілу місцевої сейсмічності та сучасних горизонтальних рухів кори за весь період деформометричних спостережень у зоні Оашського глибинного розлому, зазначили підвищення сейсмічності регіону в інтервалах інтенсивних рухів кори та наявність періодів коливання рухів кори тривалістю у 12 років, серед яких 2–3 роки виявлено знакозмінні процеси (розширення і стиснення порід, загальна величина зміщення коливається в області нульових рухів)[22]. В. Ігнатишин та співавтори дослідили екологічний аспект зв'язку магнітного поля Землі та геодинамічного стану Закарпатського внутрішнього прогину, вказали на аномалії магнітного поля Землі в періоди сейсмонебезпечних процесів[23]. В. Ігнатишин показав приклади використання результатів дослідження геофізичних аспектів екологічного стану сейсмонебезпечних регіонів у навчальному процесі в підготовці географів[24]. В. Ігнатишин та співавтори представили роботу, яка присвячена вивченню відгуку електромагнітної емісії на сейсмотектонічні процеси в Закарпатському внутрішньому прогині, встановили, що рухи кори та землетруси супроводжуються підвищеними величинами електромагнітної емісії[25]. У статті В. Ігнатишина та співавторів встановлено, що температура повітря також впливає на сучасні горизонтальні рухи кори в зоні Оашського глибинного розлому, що зумовлює зміну в їхніх динамічних характеристиках[26]. В. Ігнатишин зі співавторами розглянули зв'язок сучасних горизонтальних рухів кори,

---

[21] Лубков М. Моделювання зсувних деформацій під дією сили тяжіння. *Вісник Київського національного університету імені Тараса Шевченка. Геологія.* 2023. № 2 (101). С. 25–30. DOI: 10.17721/1728-2713.101.03

[22] Ігнатишин В., Малицький Д., Іжак Т., Молнар С., Ігнатишин М., Ігнатишин А. Геодинамічний стан Закарпатського внутрішнього прогину за результатами деформометричних спостережень у регіоні. *Вісник Київського національного університету імені Тараса Шевченка. Геологія.* 2024. № 1 (104). С. 13–21. DOI: 10.17721/1728-2713.104.02

[23] Ігнатишин В., Малицький Д., Іжак Т., Ігнатишин А., Ігнатишин М. Магнітне поле Землі та геодинамічний стан Закарпатського внутрішнього прогину: екологічний аспект. *Екологічні науки :* науково-практичний журнал / гол. ред. О. Бондар. Київ : Видавничий дім «Гельветика», 2023. № 1 (46). 210 с. С. 109–118.

[24] Ігнатишин В. Геофізичні аспекти екологічного стану сейсмонебезпечних регіонів та їх роль у підготовці майбутніх фахівців-географів. *Scientific and pedagogical internship "Challenges and development prospects of natural education and science in Ukraine and EU countries" :* Internship proceedings, July 3 – August 13, 2023. Riga, the Republic of Latvia). Riga, Latvia, 2023. 28 p. P. 7–12.

[25] Ігнатишин В., Іжак Т., Рац А. Електромагнітна емісія та сейсмотектонічні процеси в Закарпатському внутрішньому прогині. *Electromagnetic emission and seismotectonic processes in the transcarpathian internal depression. Modernization of natural science education and natural sciences in the context of digitalization.* December 6–7, 2023. Częstochowa, the Republic of Poland. Riga, Latvia : Baltija Publishing, 2023. 52 p. P. 38–41.

[26] Ігнатишин В., Іжак Т., Молнар Д С. С., Рац А.Й. Метеорологічний аспект геодинамічного стану Закарпатського внутрішнього прогину за 2021 рік. *Acta Academiae Beregsasiensis Geographica et Recreatio.* 2024. № 1. С. 32–47.

сейсмічності регіону зі змінами параметрів радіоактивного фону середовища, виміряному в центральній частині Закарпаття[27]. У своїй статті В. Ігнатишин зі співавторами встановили зв'язок варіацій астрофізичних параметрів і сучасних рухів кори в зоні Оашського глибинного розлому завдяки проведеному аналізу результатів астрофізичних і геофізичних спостережень за 2022 рік[28]. Дослідженню змін магнітного поля Землі в центральній частині Закарпаття та геодинаміки регіону присвячена праця В. Ігнатишина та співавторів, де вказано на вплив сейсмотектонічних процесів на параметри магнітного поля Землі[29]. В. Ігнатишин і співавтори у своїх дослідженнях також вивчали вплив сейсмотектонічних процесів у сейсмогенеруючих регіонах на природне імпульсне електромагнітне поле Землі, виміряне на режимній геофізичній станції «Тросник» імені Т. З. Вербицького, та встановили, що електромагнітна емісія відгукується на інтенсивні рухи кори та місцеву сейсмічність[30].

3. Дослідження параметрів гідрологічного стану центральної частини Закарпатського внутрішнього прогину за 2024 рік. Варіації кількості атмосферних опадів

На території Закарпатського внутрішнього прогину протягом тривалого часу проводяться вимірювання параметра гідрологічного стану регіону: кількість атмосферних опадів і рівні води у свердловинах на режимній геофізичній станції «Тросник» імені Т. З. Вербицького Карпатської дослідно-методичної геофізичної та сейсмологічної партії відділу сейсмічності Карпатського регіону Інституту геофізики імені С. І. Субботіна НАН України. Для вимірювання гідрологічного стану центральної частини Закарпатського внутрішнього прогину використовувалися опадомір Третякова та метеорологічної станції «Конрад». Методика аналізу результатів метеорологічних і гідрологічних параметрів полягає в побудові просторово-часового

[27] Ігнатишин В., Іжак Т., Молнар Д С. С. Радіоактивний фон середовища та сучасні рухи кори в Закарпатському внутрішньому прогині: сейсмічний аспект. *Acta Academiae Beregsasiensis Geographica et Recreatio.* 2024. № 2. С. 58–68.

[28] Ігнатишин В., Малицький Д., Іжак Т., Молнар Д С. С., Рац А., Ігнатишин М., Ігнатишин А. Варіації астрофізичних параметрів та сучасні горизонтальні рухи кори в зоні Оашського глибинного розлому за 2022 рік. *Екологічні науки :* науково-практичний журнал / гол. ред. О. Бондар. Київ : Видавничий дім «Гельветика», 2024. № 1 (52). Т. 1. 236 с. С. 42–51. URL: http://ecoj.dea.kiev.ua/52-1-2024

[29] Ігнатишин В., Малицький Д., Іжак Т., Молнар Д С. С., Рац А., Ігнатишин А. Дослідження змін параметрів магнітного поля та поля деформацій у сейсмонебезпечних регіонах. *Acta Academiae Beregsasiensis: Geographica Et Recrea,tio*. 2024. № 3. С. 48–58. DOI: 10.32782/2786-5843/2024-3-6

[30] Ігнатишин В., Іжак Т., Молнар Д С. С. Електромагнітна емісія середовища як реакція на сейсмотектонічні процеси в сейсмогенеруючих регіонах. *Acta Academiae Beregsasiensis: Geographica Et Recreatio*. 2024. № 4. С. 35–46.

аналізу кількості атмосферних опадів у добових і місячних діапазонах спостережень. Проводиться аналіз рядів даних на предмет визначення максимальних і мінімальних значень кількості атмосферних опадів, проводиться розрахунок середньомісячних величин кількості опадів, визначаються амплітуди та періоди коливання спостережуваних величин, що є важливими під час вивчення метеорологічних параметрів навколишнього середовища та дають змогу учням отримати картину метеорологічного стану навколишнього середовища. Методика дослідження може бути використана в підготовці науково-дослідницьких робіт учнів загальноосвітніх шкіл і гуртківців позашкільної освіти під час вивчення географічних процесів у рідному краї.

Січень 2024 року. Досліджено варіації величин атмосферних опадів, виміряних на режимній геофізичній станції (далі – РГС) «Тросник» у січні 2024 року, та побудовано графік часової залежності кількості атмосферних опадів на рисунку 1.

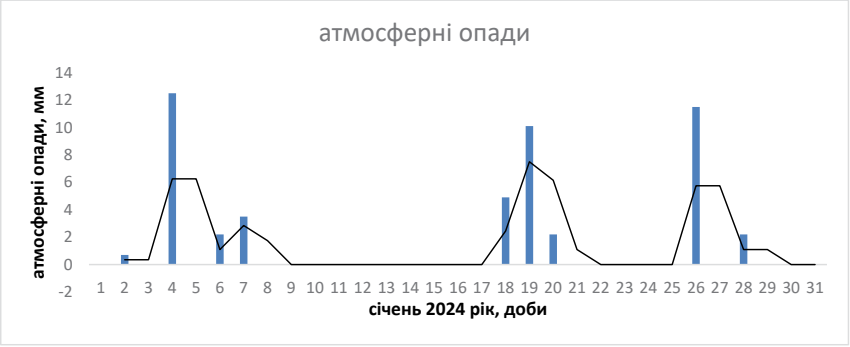


Рис. 1. Варіації атмосферних опадів, виміряних на РГС «Тросник» у січні 2024 року

За січень 2024 року на території центральної частини Закарпатського внутрішнього прогину зареєстровано 49,8 мм атмосферних опадів. Аналіз вищенаведеного графіка показує наявність трьох часових інтервалів інтенсивних атмосферних опадів однакової кількості: у першій, другій і третій декаді місяця. Величина кількості опадів відповідає приблизно місячній нормі атмосферних опадів у регіоні. Періодичність атмосферних опадів становить 15,7 діб.

Лютий 2024 року. У лютому 2024 року на території досліджуваного регіону зареєстровано 32,9 мм атмосферних опадів. Часовий розподіл атмосферних опадів у лютому 2024 року представлено на рисунку 2.

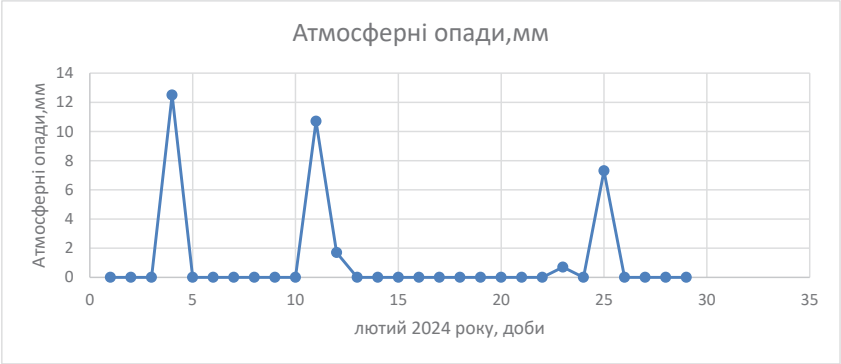


Рис. 2. Варіації атмосферних опадів у центральні частині Закарпатського внутрішнього прогину в лютому 2024 року

Періоди аномальних величин атмосферних опадів у лютому мають такі періоди прояву: 7 та 14 діб. Подібно до січня 2024 року, інтенсивні опади зареєстровано в першій, другій і третій декаді, кількість опадів спадає в алгебраїчній прогресії.

Березень 2024 року. У березні 2024 року на території РГС «Тросник» зареєстровано атмосферні опади в кількості 46,5 мм. На рисунку 3 представлено варіації атмосферних опадів у центральній частині Закарпатського внутрішнього прогину.

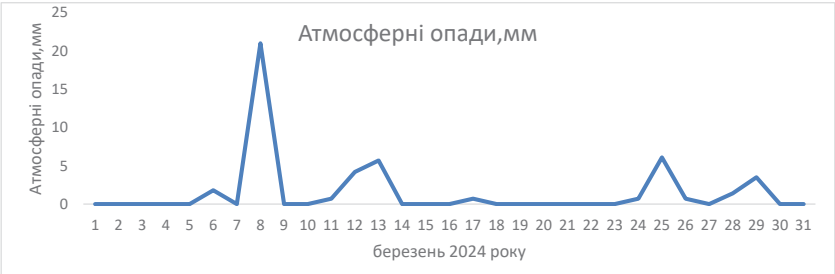


Рис. 3. Атмосферні опади в центральній частині Закарпатського внутрішнього прогину, березень 2024 року

У першій половині місяця зареєстровано 33,4 мм атмосферних опадів, у другій половині місяця випало 13,1 мм атмосферних опадів. Періодичність атмосферних опадів становить від 2 до 8 діб.

Квітень 2024 року. У квітні 2024 року в центральній частині Закарпаття випало 14,8 мм атмосферних опадів. На рисунку 4 представлено часовий розподіл атмосферних опадів у квітні 2024 року, зареєстрованих на РГС «Тросник».

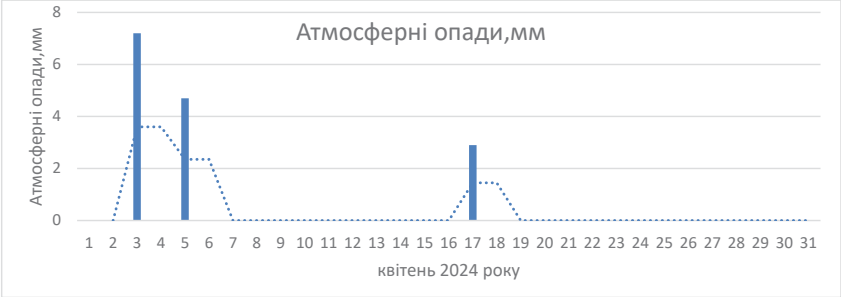


Рис. 4. Варіації атмосферних опадів, зареєстрованих на РГС «Тросник» у квітні 2024 року

Атмосферні опади, що пройшли в першій половині місяця, становлять 11,9 мм, для другої половини місяця характерна мала кількість атмосферних опадів величиною 2,9 мм. Періодичність атмосферних опадів становить 14 діб. Амплітуди атмосферних опадів спадають параболічно, що вдвічі та втричі менше за попередні місяці.

Травень 2024 року. У травні 2024 року на території Закарпатського внутрішнього прогину зареєстровано 154,6 мм атмосферних опадів. На рисунку 5 показано часовий розподіл атмосферних опадів, виміряних на РГС «Тросник» у травні 2024 року.



Рис. 5. Варіації атмосферних опадів, виміряних на РГС «Тросник» у травні 2024 року

Основна частина атмосферних опадів пройшла в першій половині місяця, найбільша частина опадів зареєстрована 9 травня 2024 року.

У другій половині місяця випало 24,2 мм. Період прояву атмосферних опадів становить 11 діб.

Червень 2024 року. У липні 2024 року на території Закарпатського внутрішнього прогину випало 94,6 мм атмосферних опадів. На рисунку 6 показано варіації атмосферних опадів на досліджуваній території в червні 2024 року.

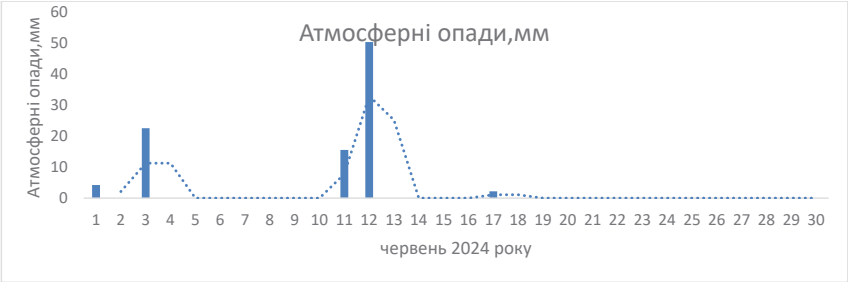


Рис. 6. Варіації атмосферних опадів, виміряних на РГС «Тросник» у червні 2024 року

Основна частина атмосферних опадів, зареєстрованих на території центральної частини Закарпаття, пройшла в першій частині місяця (92,2 мм). Періоди інтенсивних атмосферних опадів змінюються від 9 до 5 діб. Амплітуди атмосферних опадів протягом місяця зростають.

Липень 2024 року. На території центральної частини Закарпатського внутрішнього прогину протягом липня 2024 року випало 11,5 мм. На рисунку 7 показано варіації атмосферних опадів у зоні Оашського глибинного розлому в липні 2024 року.

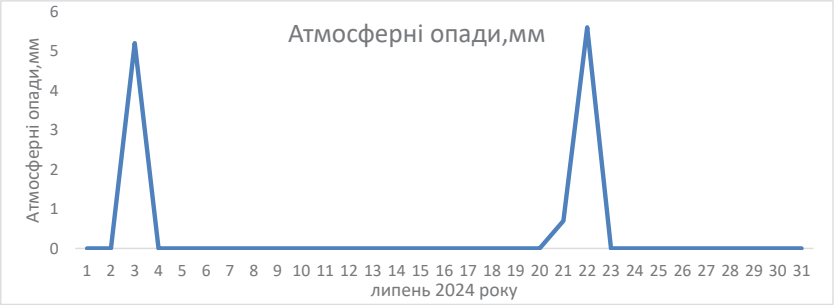


Рис. 7. Варіації атмосферних опадів, виміряних у центральній частині Закарпаття в липні 2024 року

На початку місяця випало 5,2 мм атмосферних опадів на території центральної частини Закарпаття, у другій половині місяця випало 5,6 мм атмосферних опадів. Період прояву атмосферних опадів становить 19 діб. Низька кількість атмосферних опадів пояснюється літнім періодом, який характеризується малою кількістю опадів.

Серпень 2024 року. У серпні 2024 року на території центральної частини Закарпатського внутрішнього прогину спостерігалися 32,5 мм атмосферних опадів. На рисунку 8 показано часовий розподіл атмосферних опадів на території Закарпаття в серпні 2024 року.

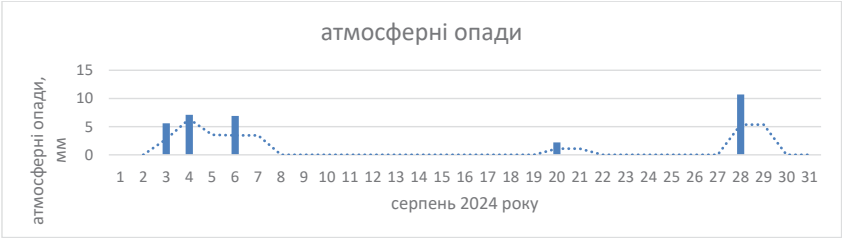


Рис. 8. Варіації атмосферних опадів у зоні Оашського глибинного розлому в серпні 2024 року

Протягом місяця зареєстровано три періоди інтенсивних атмосферних опадів у першій декаді та другій половині місяця. Часові інтервали прояву атмосферних опадів становлять 16 і 8 діб.

Вересень 2024 року. Протягом вересня 2024 року на території центральної частини Закарпатського внутрішнього прогину зареєстровано 67,9 мм атмосферних опадів, що відповідає нормі за місяць. Часовий розподіл атмосферних опадів у вересні 2024 року представлено на рисунку 9.

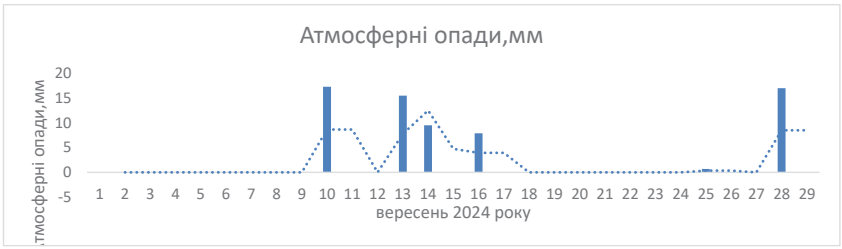


Рис. 9. Варіації атмосферних опадів, виміряні в центральній частині Закарпатського внутрішнього прогину у вересні 2024 року

Майже всі атмосферні опади за вересень 2024 року зареєстровано в першій половині місяця, протягом тижня. Інтенсивні опади зареєстровано також у кінці місяця (28 вересня, 17 мм). Періодичність прояву атмосферних опадів становить 4–14 діб.

Жовтень 2024 року. Для жовтня 2024 року характерна мала кількість атмосферних опадів у центральній частині Закарпаття, а саме 27,9 мм. На рисунку 10 представлено часовий розподіл кількості атмосферних опадів у досліджуваному регіоні за жовтень 2024 року.

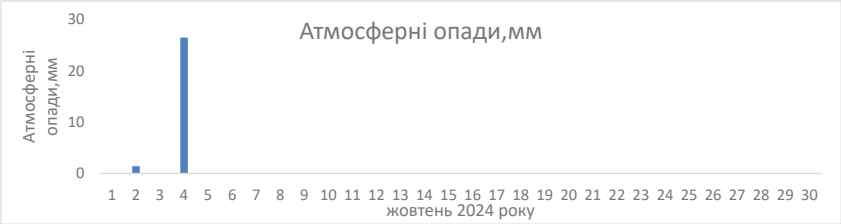


Рис. 10. Варіації кількості атмосферних опадів у жовтні 2024 року. Закарпатський внутрішній прогин

Жовтень 2024 року є місяцем, коли більшість часу була суха погода, не випадають атмосферні опади, за винятком 4 жовтня, коли випало 26,5 мм, до третини місячної норми атмосферних опадів для даного регіону.

Листопад 2024 року. Протягом листопада 2024 року на режимній геофізичні станції «Тросник» не зареєстровано атмосферних опадів.

Грудень 2024 року. На рисунку 11 представлено часовий розподіл атмосферних опадів на досліджуваній території за грудень 2024 року.



Рис. 11. Варіації атмосферних опадів на території центральної частини Закарпатського внутрішнього прогину за грудень 2024 року

Атмосферні опади у грудні 2024 року розподілені протягом місяця з періодами у 4–19 днів. Щодо інших місяців, то у грудні зареєстровано найменшу кількість атмосферних опадів. На території центральної

частини Закарпатського внутрішнього прогину зареєстровано 5,9 мм атмосферних опадів. Отже, кількість атмосферних опадів у центральній частині Закарпатського внутрішнього прогину становить 538,9 мм. Ця величина є успадкованою протягом останніх 15 років для Закарпатського внутрішнього прогину.

4. Варіації атмосферних опадів у Закарпатському внутрішньому прогині та сучасні горизонтальні рухи кори регіону за 2024 рік (за результатами геофізичного моніторингу на режимних геофізичних станціях регіону)

Атмосферні опади в регіоні впливають на геологічні процеси різної швидкості, зокрема на повільні рухи кори в Закарпатському прогині. Актуальне вивчення взаємозв'язку рухів кори та зміни метеорологічного стану регіону. Для вирішення поставленого завдання використано результати деформометричних спостережень у зоні Оашського глибинного розлому за допомогою горизонтального кварцового деформометра, що функціонує у штольні завглибшки 15 м і завдовжки 40 м, де змонтовано кварцовий горизонтальний деформограф базою 24,5 м, орієнтований на схід – захід. Протягом тривалого часу, починаючи з 1999 року, спостерігають за реальними рухами кори в центральній частині Закарпатського внутрішнього прогину. Алгоритм вивчення полягає в дослідженні варіацій атмосферних опадів у регіоні та рухів кори в зоні Оашського розлому, пошуку інтервалів часу найбільшої кореляції рядів спостереження, розрахунку коефіцієнтів кореляції, геомеханічних і гідрологічних процесів у 2024 році.

Січень 2024 року. У січні 2024 року на території зони Оашського глибинного розлому відбулося розширення порід величиною 6,7 мкм, досліджено рухи кори та варіації кількості атмосферних опадів у регіоні (рисунок 12).

Аналіз вищенаведеного графіка показує, що атмосферні опади в січні 2024 року супроводжують інтенсивні рухи кори в зоні Оашського глибинного розлому. Підвищені величини рухів кори, спостережувані на досліджуваній території, зумовлені аномальними величинами атмосферних опадів. Атмосферні опади спричиняють в основному розширення порід, що переходять у плавне стиснення порід, інтервал часу між максимумами геофізичних полів становить приблизно тиждень. Розраховано кореляційний коефіцієнт між атмосферними опадами та рухами кори, що визначають динаміку геологічних процесів, який становить 0,2. Зміщення одного ряду щодо одного на тиждень підвищить кореляційний коефіцієнт, тобто тривалість підготовчого процесу впливу гідрологічного стану на геомеханічні процеси – тижневий часовий період.



Рис. 12. Сучасні рухи кори в зоні Оашського глибинного розлому (крива коричневого кольору), атмосферні опади в центральній частині Закарпатського глибинного розлому (крива синього кольору). Січень 2024 року

Лютий 2024 року. У лютому рухи кори представлені стисненнями величиною −5,4 мкм. Розглянуто часовий розподіл зміщень земної кори в зоні Оашського глибинного розлому та варіації кількостей атмосферних опадів, виміряних на режимній геофізичній станції (РГС) у центральній частині Закарпатського внутрішнього прогину (рисунок 13).

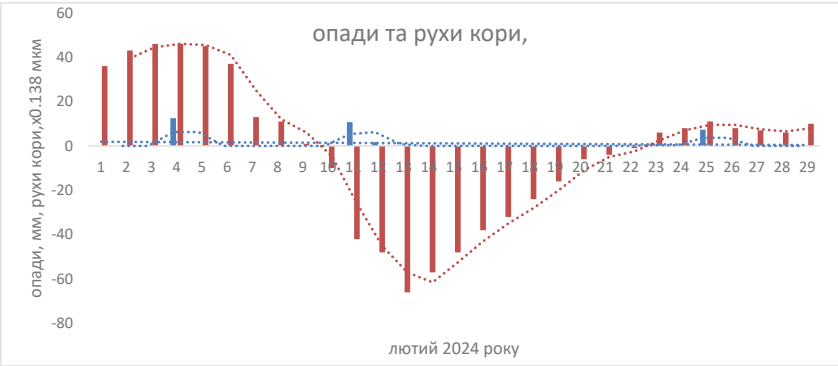


Рис. 13. Варіації атмосферних опадів на РГС «Тросник» (діаграма синього кольору), сучасні горизонтальні рухи кори в зоні Оашського глибинного розлому (діаграма коричневого кольору). Лютий 2024 року

Аналіз вищенаведеного рисунка приводить до певних висновків: інтенсивні атмосферні опади спричиняють інтенсивні рухи кори, виміряні в зоні Оашського глибинного розлому, як стиснення, так і розширення порід. Розраховано коефіцієнт кореляції рядів гідрологічного стану регіону та сучасних горизонтальних рухів у центральній частині Закарпатського внутрішнього прогину, що становить 0,1.

Березень 2024 року. У березні 2024 року в зоні Оашського глибинного розлому виміряно сучасні горизонтальні рухи кори, що становлять розширення порід величиною 1,24 мкм. Досліджено взаємозв'язки між атмосферними опадами в регіоні та рухами кори в березні 2024 р. (рисунок 14).

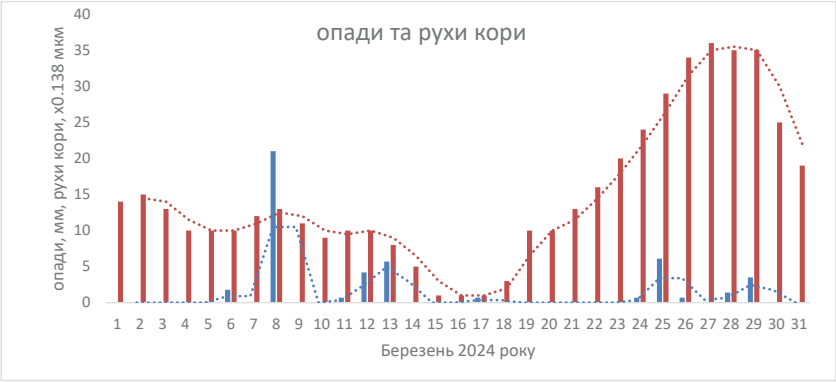


Рис. 14. Варіації кількості атмосферних опадів у центральні частині Закарпаття (крива синього кольору), сучасні горизонтальні рухи кори в зоні Оашського глибинного розлому (діаграма жовтого кольору). Березень 2024 року

Атмосферні опади супроводжуються стисненнями порід у першій половині місяця та розширеннями порід від другої половини березня 2024 року. Інтенсивні опади протягом однієї-двох діб спричиняють стиснення порід, можуть вплинути на зміну знака рухів кори. Розраховано ступінь кореляції параметрів гідрологічного та геодинамічного станів регіону, який становить 0,01. Коефіцієнт кореляції в першій половині місяця становить 0,2.

Квітень 2024 року. Сучасні горизонтальні рухи кори, виміряні на пункті деформометричних спостережень «Королеве» у квітні 2024 року, представлені стисненнями порід величиною −0,138 мкм. Досліджено

зв’язок сучасних рухів кори в зоні Оашського глибинного розлому з варіаціями атмосферних опадів у квітні 2024 року, що представлено на рисунку 15.



Рис. 15. Варіації атмосферних опадів у Закарпатському внутрішньому прогині (крива синього кольору), сучасні горизонтальні рухи кори в зоні Оашського глибинного розлому (крива коричневого кольору). Квітень 2024 року

Дослідження сучасних рухів кори, їхньої реакції на атмосферні опади вказують на суттєвий вплив параметрів гідрологічного стану на геодинамічний стан сейсмонебезпечного регіону. Інтенсивні опади супроводжуються стисненнями порід в обох випадках. Землетруси рівномірно розподілені на часовій прямій, вони реєструються як у разі стиснення порід, так і за їх розширення. Розраховано ступінь кореляції між атмосферними опадами та рухами кори в зоні Оашського глибинного розлому, що становить 0,2.

Травень 2026 року. У травні 2024 року в зоні Оашського глибинного розлому відбулося розширення порід величиною 3,45 мкм. Досліджено взаємозв’язок між сучасними горизонтальними рухами кори, виміряними на пункті деформометричних спостережень «Королеве», та варіаціями атмосферних опадів, виміряних у центральній частині Закарпатського внутрішнього прогину (рисунок 16). Дослідження впливу атмосферних опадів на рухи кори в регіоні встановили, що інтенсивні опади супроводжуються загальним стисненням порід у перших двох декадах місяця. Остання декада місяця характеризується розширеннями порід, що переходять у стиснення порід після інтенсивних опадів.

Проведено розрахунок ступеня кореляції варіацій атмосферних опадів і зміщень земної кори в цей період, що становить −0,1.



Рис. 16. Сучасні рухи кори в зоні Оашського глибинного розлому (крива коричневого кольору), варіації атмосферних опадів у центральній частині Закарпатського внутрішнього прогину (крива синього кольору). Травень 2024 року

Червень 2024 року. У червні 2024 року в зоні Оашського глибинного розлому спостерігали стиснення верхніх шарів земної кори величиною −7 мкм. Побудовано часові розподіли атмосферних опадів на РГС «Тросник» у червні 2024 року та зміщення земної кори у штольні ПДС (пункт деформометричних спостережень) «Королеве» з метою виявлення впливу атмосферних опадів на геодинамічний стан Закарпатського внутрішнього прогину, а саме його центральної частини, представлено на рисунку 17. Атмосферні опади в червні 2024 року супроводжуються лінійним стисненням верхніх шарів земної кори протягом двох декад. Проведено розрахунок ступеня кореляції атмосферних опадів і зміщень верхніх шарів земної кори в червні 2024 року, що дорівнює 0,3.

Липень 2024 року. У липні земна кора в зоні Оашського глибинного розлому зазнала розширення порід величиною 9,25 мкм. Побудовано часові варіації атмосферних опадів у регіоні та часові варіації зміщень земної кори (рисунок 18). Атмосферні опади в досліджуваний період супроводжуються стисненнями порід на початку місяця, у другій половині місяця опади відбуваються в інтервалах розширення порід, але вони привели до локального стиснення порід. Розраховано коефіцієнт кореляції

атмосферних опадів і зміщень верхніх шарів земної кори за сучасних горизонтальних рухів кори, який становить 0,1.

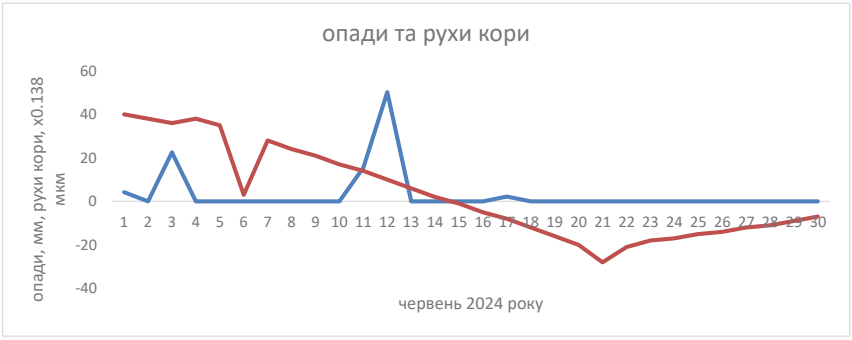


Рис. 17. Атмосферні опади (діаграма синього кольору), сучасні рухи кори в зоні Оашського глибинного розлому (діаграма коричневого кольору). Червень 2024 року



Рис. 18. Варіації атмосферних опадів у центральні частині Закарпаття (діаграма синього кольору), сучасні рухи кори в зоні Оашського глибинного розлому (крива коричневого кольору). Липень 2024 року

Отже, на прикладі аналізу варіацій кількості атмосферних опадів, що зареєстровані протягом 2024 року в центральній частині Закарпатського внутрішнього прогину, методики аналізу й алгоритму дослідження впливу атмосферних опадів на рухи кори в зоні Оашського глибинного розлому, що проведено на прикладі січня – липня 2024 року, показано

вплив гідрологічного стану на геодинамічний стан регіону, пропонується результати проведених аналізів застосувати в навчально-виховному процесі на уроках природничих дисциплін: географії, екології, фізики. Методику спостереження та аналізу природничих процесів пропонується використовувати для проведення дослідницьких робіт, підготовки учнями проєктів і тез на різноманітні конкурси, олімпіади в системі Малої академії наук України, на заняттях гуртків природничого спрямування (географія, екологія, гідрологія, метеорологія).

ВИСНОВКИ

У роботі представлено практичне застосування результатів метеорологічних, гідрологічних досліджень на теренах Закарпатського внутрішнього прогину, досліджень геодинамічного стану зони Оашського глибинного розлому при викладанні природничих дисциплін у системі загальної та позашкільної освіти. Проведено аналіз публікацій з даної тематики, що висвітлюють стан вивчення географії та її перспективи, розглянуто результати аналізу спостереження варіацій кількості атмосферних опадів у центральній частині Закарпатського внутрішнього прогину. Розраховано річну кількість опадів у досліджуваному регіоні, яка становить приблизно 539,8 мм опадів, що є середньою величиною протягом 2011–2024 років. Сучасні рухи кори протягом 2024 року, виміряні за допомогою горизонтального кварцового деформометра базою 24,5 м й азимутом А = 80⁰ (напрямок схід – захід) у зоні Оашського глибинного розлому, – розширення порід величиною 13,85 х 10^{-7}. Вони є успадкованими рухами в Карпатському регіоні, де рухи кори відбуваються в діапазоні $-10 \times 10^{-7} \div 30 \times 10^{-7}$. Попередні та сучасні дослідження зв'язків геодинамічного стану зони Оашського глибинного розлому й варіацій виміряних атмосферних опадів у центральній частині Закарпатського внутрішнього прогину доводять вплив інтенсивних атмосферних опадів на динаміку рухів кори, що впливає на розрядку напружено-деформованого стану порід і перерозподіл геомеханічної енергії. Модель сейсмотектонічних процесів охоплює гідрогеологічний аспект даного сейсмогенеруючого регіону. Інтенсивні опади спричиняють зміну рівня води в річках регіону, що чинить тиск на поверхню земної кори, що виражається в послідовній зміні інтенсивного розширення порід на повільне стиснення порід у часовому інтервалі, який перевищує розширення порід. Проведене дослідження в місячному інтервалі підтверджує гідрогеологічний аспект геодинаміки регіону: інтенсивні рухи кори супроводжують інтенсивні атмосферні опади. Важливість проведеного дослідження полягає в тому, що воно є актуальним для вивчення сейсмічності даного регіону. Відомо,

що інтенсивні рухи кори акумулюють геомеханічну енергію земної кори та, за визначених умов, можуть бути спусковим гачком для вивільнення накопиченої енергії. Отримані результати дослідження та використана для цього методика можуть бути корисні під час навчально-виховного процесу на уроках географії, екології та інших природничих дисциплін і на заняттях гуртків природничого циклу.

АНОТАЦІЯ

Актуальність пошуку нових засобів і технологій під час вивчення природничих дисциплін та їх практичного застосування в навчально-виховному процесі полягає в тому, що зростає кількість нової інформації, яку важливо використати для підвищення ефективності викладання предметів наук про Землю. Аналізується стан вивчення окремих природничих дисциплін, зокрема географії, геофізики, фізики й екології, перспективи їх розвитку в сучасних умовах. У розділі представлено приклад проведення та використання досліджень географічних процесів у регіоні в навчально-виховному процесі, на уроках географії, зокрема під час проведення занять гуртків позашкільної освіти з географії, гідрології, екології, фізики. У роботі представлено алгоритм вивчення проблем екологічного стану Закарпаття на основі моніторингу природних процесів, пропозиції використання результатів цих досліджень у навчально-виховному процесі. У розділі досліджено географічні процеси: гідрологічний стан регіону, сейсмічний стан регіону та геодинамічний стан регіону; педагогічні аспекти вивчення природних явищ. Вивчено параметри, що характеризують сучасні горизонтальні рухи кори в зоні Оашського глибинного розлому, сейсмічний стан Карпатського регіону, варіації параметрів гідрологічного стану центральної частини Закарпатського внутрішнього прогину. Описано методичні аспекти використання отриманих результатів досліджень у навчально-виховному процесі загальноосвітньої школи та підготовки учнями науково-дослідницьких робіт на різноманітні конкурси із природничих наук. Показано методи дослідження: метод аналізу і синтезу, кореляційний аналіз, графічні методи. Для досягнення поставленої в роботі мети використано результати режимних геофізичних, геодинамічних, гідрологічних спостережень у Закарпатському внутрішньому прогині у 2024 році. У результаті дослідження встановлено, що в регіоні за досліджуваний період випала кількість атмосферних опадів, які в середньому випадали починаючи із 2011 року. Геомеханічні рухи кори в зоні Оашського глибинного розлому представлені розширеннями порід, що є успадкованою величиною для даного регіону. Підтверджується гідрологічний аспект геодинамічного стану регіону, що є складником

сейсмотектонічних процесів у Закарпатському внутрішньому прогині. Отримані результати та методи їх використання важливі в навчально-виховному процесі для вивчення географічних процесів та явищ у регіоні.

Література

1. Мальчикова Д., Мезенцев К. Публічний імідж географії в контексті трансформації стандартів базової середньої освіти: досвід України і світу. *Український географічний журнал.* 2022. № 1. С. 53–63. URL: https://ukrgeojournal.org.ua/sites/default/files/UGJ-1-2022_53-63.pdf

2. Руденко Л., Заячук М., Лісовський С., Маруняк Є., Муніч Н., Пересадько В., Пономаренко О. Військова агресія Росії в Україні та її наслідки для географічної освіти і науки. *Український географічний журнал.* 2022. № 4. С. 4–12. [Англійською мовою]. DOI: 10.15407/ugz2022.04.004.4

3. Сергєєва А., Єсембек С., Абдулліна А., Баубекова Г. Аналіз змісту розділу «Країнознавство» оновленої шкільної навчальної програми з географії у Казахстані. *Український географічний журнал.* 2023. № 2. С. 60–70. [Англійською мовою]. DOI: 10.15407/ugz2023.02.060

4. Дронова О., Маруняк Є., Руденко Л., Топчієв О. Імідж і місія географічної науки в Україні. *Український географічний журнал.* 2023. № 3. С. 3–11. [Українською мовою].

5. Семергей-Чумаченко А., Озимко Р. Сильні дощі та зливи в Закрпатській області як стихійні метеорологічні явища (1999–2018 рр.). *Український географічний журнал.* 2019. № 4. С. 11–17. URL: https://ukrgeojournal.org.ua/sites/default/files/UGJ-2019-4_11-17.pdf

6. Скриник О., Осадчий В., Сзентімрей Т., Біхарі З., Сіденко В., Ошурок Д., Бойчук Д., Скриник О. Просторова інтерполяція кліматологічних даних з урахуванням топографічних та фізико-географічних особливостей території України. *Український географічний журнал.* 2020. № 2. С. 13–19. URL: https://ukrgeojournal.org.ua/sites/default/files/UGJ-2-2020_13-19.pdf

7. Малицький Д., Гнип А., Грицай О., Муровська А., Кравець С., Козловський Є. Механізм виникнення та тектонічна обстановка землетрусу 29.09.2017 р. поблизу Стебника. *Геодинаміка.* 2018. № 1 (24). С. 100–110. DOI: 10.23939/jgd2018.01.100

8. Семенов В., Ладанівський Б., Петрищев М. Виникнення сліду землетрусів у варіаціях природного електромагнітного поля. *Геодинаміка.* 2018. № 2925. С. 65–70. DOI: 10.23939/jgd2018.02.065

9. Марченко О., Перій С., Ломпас О., Голубінка Ю., Марченко Д., Крамаренко С., Абдулвасіу Салаву. Визначення тензора горизонтальних швидкостей деформацій у Західній Україні. *Геодинаміка.* 2019. № 2 (27). С. 5–15. DOI: 10.23939/jgd2019.02.005

10. Гопченко Є., Овчарук В., Шакірзанова Ж., Гопцій М., Траскова А., Швець Н., Сербова З., Тодорова О. Моделювання екстремально високих паводків на прикладі гірських регіонів України. *Вісник Київського національного університету імені Тараса Шевченка. Геологія*. 2018. № 3 (82). С. 6–15. DOI: 10.17721/17282713.82.01

11. Чалий О., Дяконеску М., Гурова І., Лісовий Ю., Пігулевський П., Щербина С., Шевцов А., Шумлянська Л. Причина активної сейсмічності в Україні. *Вісник Київського національного університету імені Тараса Шевченка. Геологія*. 2018. № 4 (83). С. 38–45. DOI: 10.17721/1728-2713.83.05

12. Кошляков О., Диняк О., Кошлякова І., Кошлякова Т. Гідрогеологічні особливості розрахунків стійкості укосів і схилів у межах урбанізованих територій. *Вісник Київського національного університету імені Тараса Шевченка. Геологія*. 2018. № 4 (83). С. 79–83. DOI: 10.17721/1728-2713.83.11

13. Зацерковний В., Богословський М. Розробка моделі функціонального стану об'єкта моніторингу для завдань оцінки ризиків виникнення надзвичайних ситуацій. *Вісник Київського національного університету імені Тараса Шевченка. Геологія*. 2018. № 4 (83). С. 91–97. DOI: 10.17721/1728-2713.83.13

14. Назаревич А., Назаревич Л., Баштевич М. Виділення малоамплітудних деформаційних аномалій- провісників місцевих Закарпатських землетрусів з урахуванням метеотермопружних деформацій. *Вісник Київського національного університету імені Тараса Шевченка. Геологія*. 2019. № 1 (84). С. 21–26. DOI: 10.17721/1728-2713.84.03

15. Багрій С., Кузьменко Е., Дзьоба У. Зв'язок природного імпульсного електромагнітного поля Землі з напруженнями та деформаціями гірських порід на відпрацьованих родовищах солі в Передкарпатті в задачах прогнозування розвитку карсту. *Вісник Київського національного університету імені Тараса Шевченка. Геологія*. 2020. № 2 (89). С. 79–88. DOI: 10.17721/1728-2713.89.11

16. Хом'як М., Малицький Д., Асташкіна О., Махніцький М., Кравець С., Микита А., Грицай О. Регресійний аналіз сейсмічних і геофізичних параметрів та його застосування для дослідження сейсмічності Закарпатського регіону. *Вісник Київського національного університету імені Тараса Шевченка. Геологія*. 2020. № 3 (90). С. 49–53. DOI: 10.17721/1728-2713.90.07

17. Углицьких Є., Вижва С., Іванік О. Моніторинг вертикальних зміщень земної поверхні території Закарпаття за даними радарної інтерферометрії. *Вісник Київського національного університету імені Тараса Шевченка. Геологія.* 2020. № 4 (91). С. 94–99. DOI: 10.17721/1728-2713.91.13

18. Пирієв Р. Огляд електромагнітних моніторингових досліджень у прогнозі землетрусів: останні результати та нові перспективи. *Вісник*

Київського національного університету імені Тараса Шевченка. Геологія. 2022. № 1 (96). С. 40–45. DOI: 10.17721/1728-2713.96.06

19. Ігнатишин В., Малицький Д., Іжак Т., Ігнатишин М., Ігнатишин А. Моніторинг сейсмотектонічних процесів у Закарпатському внутрішньому прогині за результатами комплексних геофізичних спостережень. *Вісник Київського національного університету імені Тараса Шевченка. Геологія.* 2022. № 3 (98). С. 42–48. DOI: 10.17721/1728-2713.98.05

20. Іванік О., Шевчук В., Кравченко Д., Гадяцька К. Прогнозування зсувної небезпеки та оцінка впливу на суспільство: головні підходи, принципи, методи. *Вісник Київського національного університету імені Тараса Шевченка. Геологія.* 2023. № 1 (100). С. 5–14. DOI: 10.17721/1728-2713.100.01

21. Лубков М. Моделювання зсувних деформацій під дією сили тяжіння. *Вісник Київського національного університету імені Тараса Шевченка. Геологія.* 2023. № 2 (101). С. 25–30. DOI: 10.17721/1728-2713.101.03

22. Ігнатишин В., Малицький Д., Іжак Т., Молнар С., Ігнатишин М., Ігнатишин А. Геодинамічний стан Закарпатського внутрішнього прогину за результатами деформометричних спостережень у регіоні. *Вісник Київського національного університету імені Тараса Шевченка. Геологія.* 2024. № 1 (104). С. 13–21. DOI: 10.17721/1728-2713.104.02

23. Ігнатишин В., Малицький Д., Іжак Т., Ігнатишин А., Ігнатишин М. Магнітне поле Землі та геодинамічний стан Закарпатського внутрішнього прогину: екологічний аспект. *Екологічні науки :* науково-практичний журнал / гол. ред. О. Бондар. Київ : Видавничий дім «Гельветика», 2023. № 1 (46). 210 с. С. 109–118. DOI: 10.32846/2306-9716/2023.eco.1-46.19

24. Ігнатишин В. Геофізичні аспекти екологічного стану сейсмонебезпечних регіонів та їх роль в підготовці майбутніх фахівців-географів. *Scientific and pedagogical internship "Challenges and development prospects of natural education and science in Ukraine and EU countries" :* Internship proceedings, July 3 – August 13, 2023. Riga, the Republic of Latvia. Riga, Latvia, 2023. 28 p. P. 7–12.

25. Ігнатишин В., Іжак Т., Рац А. Електромагнітна емісія та сейсмотектонічні процеси в Закарпатському внутрішньому прогині. *Electromagnetic emission and seismotectonic processes in the transcarpathian internal depression. Modernization of natural science education and natural sciences in the context of digitalization,* December 6–7, 2023. Częstochowa, the Republic of Poland. Riga, Latvia : Baltija Publishing, 2023. 52 p. P. 38–41.

26. Ігнатишин В., Іжак Т., Молнар Д С.С., Рац А. Метеорологічний аспект геодинамічного стану Закарпатського внутрішнього прогину за

2021 рік. *Acta Academiae Beregsasiensis Geographica et Recreatio.* 2024. № 1. С. 32–47.

27. Ігнатишин В., Іжак Т., Молнар Д С.С. Радіоактивний фон середовища та сучасні рухи кори в Закарпатському внутрішньому прогині: сейсмічний аспект. *Acta Academiae Beregsasiensis Geographica et Recreatio.* 2024. № 2. С. 58–68.

28. Ігнатишин В., Малицький Д., Іжак Т., Молнар Д С.С., Рац А., Ігнатишин М., Ігнатишин А. Варіації астрофізичних параметрів та сучасні горизонтальні рухи кори в зоні Оашського глибинного розлому за 2022 рік. *Екологічні науки :* науково-практичний журнал / гол. ред. О. Бондар. Київ : Видавничий дім «Гельветика», 2024. № 1 (52). Т. 1. 236 с. С. 42–51. URL: http://ecoj.dea.kiev.ua/52-1-2024

29. Ігнатишин В., Малицький Д., Іжак Т., Молнар Д С.С., Рац А., Ігнатишин А. Дослідження змін параметрів магнітного поля та поля деформацій у сейсмонебезпечних регіонах. *Acta Academiae Beregsasiensis: Geographica Et Recreatio*. 2024. № (3). С. 48–58. DOI: 10.32782/2786-5843/2024-3-6

30. Ігнатишин В., Іжак Т., Молнар Д С.С. Електромагнітна емісія середовища як реакція на сейсмотектонічні процеси в сейсмогенеруючих регіонах. *Acta Academiae Beregsasiensis: Geographica Et Recreatio*. 2024. № 4. С. 35–46.

Information about the author:
Ihnatyshyn Vasyl,
Candidate of Physical and Mathematical Sciences,
Senior Research Fellow at the Department of Seismicity
of the Carpathian Region
S.I. Subbotin Institute of Geophysics
of the National Academy of Sciences of Ukraine
27, Yaroslavenka Street, Lviv, Ukraine;
Associate Professor at the Department of Geography and Tourism
Ferenc Rákóczi II Transcarpathian Hungarian University
6, Kossuth Square, Berehove, Ukraine

CHAPTER 41

ORGANIZATIONAL AND PEDAGOGICAL CONDITIONS FOR CREATING A HEALTHY ENVIRONMENT IN PRESCHOOL EDUCATION

Kalichak Yurii
DOI https://doi.org/10.30525/978-9934-26-714-7-41

INTRODUCTION

Contemporary societal challenges – such as the growing technogenic impact on nature, the alarming trend of environmental degradation, and humanity's disregard for natural laws – directly intensify the problem of preserving and strengthening the health of the youngest members of society.

Recent observations confirm a steady decline in the health of preschool children. In our view, the primary causes include unfavourable socio-economic living conditions; insufficient opportunities to stimulate motor activity both at home and in preschool institutions; imbalanced nutrition; inadequate attention to physical hardening; and neglect of sanitary, hygienic, temperature, and light requirements in organizing children's daily lives.

Numerous contradictions between the developmental needs of preschoolers and the educational methods employed in practice are, in our opinion, the central reasons for this situation. To address these contradictions, a health-preserving approach to education has emerged. This approach prioritizes the health of all participants in the pedagogical process and enables the optimal organization of life for both educators and pupils.

It is well established that a health-preserving environment positively influences the formation of a harmonious preschool personality. Such an environment facilitates the achievement of several urgent tasks: the preservation and improvement of health, the development of health-preserving behaviour, the cultivation of a broader health culture, and the successful integration of its spiritual, moral, aesthetic, and physical components.

We define a health-preserving environment as a favourable setting for life and diverse human activities, encompassing social, material, and spiritual conditions that positively affect the health of preschool children. Adults must

therefore recognize their responsibility to ensure conditions in which harmful influences are excluded and opportunities exist both for maintaining normal bodily functions and for restoring those that have been impaired.

We fully concur with the assertion that "the health-preserving environment of a preschool educational institution, in the general sense, entails compliance with sanitary and hygienic standards, air and light regimes, and other requirements across all aspects of organizing a child's life in an educational institution"[1].

The establishment of such an environment is inherently interdisciplinary, drawing upon insights from pedagogy, pediatrics, physiology, hygiene, psychology, human ecology, sociology, and related fields. It is therefore unsurprising that scholars interpret the concept of a "health-preserving environment" in diverse ways[2].

The strategic objectives of modern preschool education extend beyond preserving and strengthening health to include instilling the foundations of a healthy lifestyle in children. The practical realization of this goal requires the introduction of scientifically grounded health-preserving technologies into preschool practice. These technologies form the core of a health-preserving environment, relying on the close interaction of multiple educational factors to enhance children's well-being[3].

The rapid transformation of contemporary society – accelerated by the full-scale invasion and the tragic realities of war – has reshaped the provision of educational services in preschool institutions. In this context, the role of maintaining a healthy lifestyle has grown significantly, contributing to the broader formation of a national health culture.

1. Components of the category "health-preserving environment"

The contemporary conditions of social life have intensified the problem of preserving and improving the health of preschool children. This has created an urgent need for comprehensive educational work within preschool institutions, among parents, and among teaching staff, aimed at raising the overall level of valeological culture. The preschool educational environment must necessarily

[1] Калічак Ю. Л. Формування здоров'язбережувальної компетентності вихователів внаслідок вивчення курсу «Оздоровчі технології та діагностичні методики фізичного розвитку дітей дошкільного віку». *Наукові інновації та передові технології.* 2022. № 1(3). С. 234–243.

[2] Калічак Ю. Л. Фізичне виховання дітей дошкільного віку засобами народних рухливих ігор. Modern science : prospects, innovations and technologies : Scientific monograph. Part 2. Riga, Latvia : Baltija Publishing, 2024. P. 250 274.

[3] Базовий компонент дошкільної освіти (Державний стандарт дошкільної освіти) : нова редакція. Затверджено Наказом Міністерства освіти і науки України від 12.01.2021 р. № 33. Київ : [Б. в.], 2021. 30 с.

contribute to the psychophysical development of children and support the improvement of their health[4].

At present, the spiritual, psychophysical, social, intellectual, and emotional state of society is deeply concerning. The causes of this situation include "a full-scale war as a result of Russia's unprovoked aggression, the actual state of the environment, the lack of control over the use of Internet resources, a sedentary lifestyle, and failure to adhere to the principles of a healthy lifestyle, all of which collectively lead to a significant deterioration in the health of preschoolers. Parents, teachers, and society face the task of ensuring a full, happy, and healthy childhood. Preschool children require personal space appropriate to their age characteristics, as well as opportunities to develop abilities, inclinations, and interests for the comprehensive and harmonious development of their personality"[5].

These requirements are reflected in regulatory documents governing preschool education. For example, the Law of Ukraine On Preschool Education stipulates that institutions must create appropriate "conditions for the development, upbringing, and education of children; a work regime; conditions for physical development and health promotion in accordance with sanitary and hygienic requirements, and ensure their compliance; form hygienic skills and the foundations of a healthy lifestyle in children, as well as norms of safe behavior; contribute to the preservation and strengthening of health, and the mental, psychological, and physical development of children"[6].

The Basic Component of Preschool Education emphasizes that "the educational environment is a set of objective external conditions, factors, and social objects necessary for the successful functioning of education; it is a system of influences and conditions for personality formation, as well as opportunities for development contained within the social and spatial-objective environment"[7].

Modern scholars interpret the category of "health-preserving environment" in diverse ways. One of the most common definitions is: "a health-preserving

---

[4] Kalichak Yu. L. Formation of social competence of senior preschool children by means of story-based role-playing games Modernisation of Higher Education in Ukraine in the Context of Globalisation : Monograph / edited by A. M. Ivanovska. Kamianets-Podilskyi Higher Educational Institution "Podillia State University". Riga, Latvia : «Baltija Publishing», 2025. P. 185–195.

[5] Калічак Ю. Л. Формування культури здоров'я дітей дошкільного віку: превентивний аспект. Public health system in Ukraine and EU countries: realities, transformation, development vectors, perspectives : scientific monograph. Riga, Latvia : Baltija Publishing, 2024. P. 561–585.

[6] Калічак Ю. Л. Педагогічні умови створення здоров'язбережувального середовища закладу дошкільної освіти. *Advanced top technology* : електронний науковий журнал № 3. Харків : СГ НТМ «Новий курс», 2024. С. 58–59.

[7] Базовий компонент дошкільної освіти (Державний стандарт дошкільної освіти) : нова редакція. Затверджено Наказом Міністерства освіти і науки України від 12.01.2021 р. № 33. Київ : [Б. в.], 2021. 30 с.

environment is an environment in which conditions are created that allow a child to recognize the value of health, learn methods of preserving it, and acquire self-regulation skills that enable the maintenance of health"[8].

In general terms, the health-preserving environment of an educational institution is defined as "compliance with sanitary and hygienic standards, air and light regimes, and other requirements across all aspects of organizing a child's life in an educational institution"[9].

When creating such an environment, it is essential to consider the age-related capabilities of preschoolers, adhere to established sanitary and hygienic requirements, and prioritize the health of both pupils and teachers. Continuous monitoring of changes in the psychophysiological state and health of all participants in the educational process is required. In preschool institutions, systematic monitoring of all aspects of health – spiritual, moral, and psychophysical – should be conducted twice a year under the supervision of a medical professional. Health-preserving activities must be carried out daily, with mandatory documentation of organizational measures, and health-related issues must be integrated into educational programs. The priority of the educational process is to ensure its health-preserving orientation, which must be guaranteed by the pedagogical staff through careful adherence to established conditions. Pupils themselves should act as assistants in this process, thereby fostering conscious and active learning in accordance with their age characteristics. The educational workload and the complexity of valeological material must be proportionate to the individual capacities of children[10].

The success of health-preserving activities in preschool institutions depends greatly on educational work involving children, parents, and teachers, aimed at raising the general level of valeological culture. Active cooperation among all participants in the educational process is crucial. Thoughtful, coordinated collaboration among stakeholders ensures informed choices regarding the use of appropriate health-preserving technologies in institutional practice.

The main criteria influencing the formation of a health-preserving educational environment in preschool institutions include: "an educational program oriented toward achieving children's health-preserving competencies;

---

[8] Калічак Ю. Л., Семкович Х. І. Передумови формування ціннісного ставлення до власного здоров'я дошкільників. *Наука, освіта та суспільство в XXI столітті: наукові ідеї та механізми реалізації* : збірник тез доповідей міжнародної науково-практичної конференції (Кропивницький, 19 листопада 2022 р.) : у 2 ч. Кропивницький : ЦФЕНД, 2022. Ч. 1. С. 22–25.

[9] Сварковська Л. Оздоровлюємо дітей разом з батьками. Вихователь-методист дошкільного закладу. 2011. № 6. С. 49–56.

[10] Калічак Ю. Л., Бац Р. М., Кичма В. П. Сучасні підходи до створення здоров'язбережувального середовища закладу дошкільної освіти. *Advanced top technology* : електронний науковий журнал № 1. Харків : СГ НТМ «Новий курс», 2024. С. 5–7.

a development program for the institution that outlines the content of activities and the algorithm of actions aimed at ensuring the health-preserving process; priority educational tasks, including the introduction of innovative health-preserving technologies to foster a conscious attitude toward health; the current health status of preschoolers; the orientation and effectiveness of health-improving measures; the dynamics of children's physical development; the human resource potential of the institution; the involvement and responsibility of staff for their own health and that of pupils; the level of material and technical support; territorial environmental factors; readiness to cooperate with families and recognition of the importance of health-preserving activities; and the ability to assess and monitor the outcomes of applied technologies"[11].

Analysis of the specialized literature allows us to assert with confidence that the educational environment of preschool institutions plays a central role in preserving and strengthening health, which is regarded as the highest human value. For this reason, the problem of forming a health-preserving educational environment will remain relevant in the foreseeable future. Effective cooperation between preschool institutions and families will significantly contribute to the successful development of preschoolers' health-preserving competencies during their time in preschool.

The functions of a health-preserving environment include coordination, integration, adaptive, socio-cultural, orientation, propaedeutic, stimulating, and others.

Coordination ensures the interaction of various structures in matters of preserving and strengthening the health of younger generations, while maintaining continuity in the implementation of state policy across different educational levels.

Integration is closely linked to coordination and aims to develop common approaches to organizing a health-preserving environment.

Adaptive functions support the enhancement of children's adaptive and functional capacities, preparing them for school.

Socio-cultural functions introduce children to the system of values established by society regarding individual health, fostering health-preserving behavior as a personal value.

Orientation enables children, in accordance with their age capabilities, to achieve self-determination in various spheres of life and to find appropriate solutions to diverse life situations.

[11] Калічак Ю. Л., Дрогомирецька Н. Т. Особливості використання здоров'язбережувальних технологій в роботі з дошкільниками. *Наука, освіта та суспільство в XXI столітті : наукові ідеї та механізми реалізації* : збірник тез доповідей міжнародної науково-практичної конференції (Кропивницький, 19 листопада 2022 р.) : у 2 ч. Кропивницький : ЦФЁНД, 2022. Ч. 1. С. 18–21.

Propaedeutic functions provide valeological support within the educational process, both in content – by forming valeological concepts and practical skills – and in the forms of pedagogical work.

Stimulating functions involve the use of positive feedback, allowing educators to monitor changes in children's personalities, including health indicators, with attention not only to final outcomes but also to the processes leading to them.

Creating a health-preserving environment requires adherence to fundamental principles of organizing health-preserving activities: "the principle of transition to a value paradigm of education, the principle of prioritization, the principle of pedagogical support (pedagogical accompaniment), the principle of continuity, the principle of integration of efforts among subjects of the educational process aimed at ensuring the development of children's physical and mental health, the principle of harmonious personality development, and the principle of health-oriented educational processes"[12].

The health-preserving environment of a modern preschool institution must also comply with specific pedagogical conditions: "the development and approval of a health-preserving concept; formulation of strategic goals and objectives; implementation of diagnostics and monitoring of children's health; introduction of children to the basics of a healthy lifestyle; formation of valeological competence; improvement of the professional competence of the pedagogical team in the context of health-preserving activities; cultivation of a culture of health; meaningful interaction among all subjects of the pedagogical process; and clear definition of duties and responsibilities in implementing program goals"[13].

2. Prerequisites for creating a health-preserving environment in preschool institutions

Children's daily habits and the healthy lifestyle instilled from early childhood form the foundation for establishing a health-preserving environment in preschool institutions.

Researchers have identified "certain contradictions between: the objective needs of society in improving the health of preschool children and the lack of systematic provision for creating a health-preserving environment within the modern preschool educational process; the recognition by families and

[12] Калічак Ю. Л., Долішняк Н. В. Вплив родини на формування здорової особистості дитини дошкільного віку. *Сучасні виклики та актуальні проблеми науки, освіти, технологій і суспільства* : зб. тез доповідей міжнар. наук.-практ. конференції (Ізмаїл, 6 жовтня 2023 р.) : у 2 ч. Ізмаїл : ЦФЕНД, 2023. Ч. 1. С. 15–16.

[13] Kalichak Yu. L., Demyanchuk M. M. The essence of preparation of preschool staff for health protection activities. Суть підготовки фахівців дошкільного профілю до здоров'язбережувальної діяльності. *Сучасний вимір психології та педагогіки* : збірник тез наукових робіт учасників міжнародної науково-практичної конференції (м. Львів, 21–22 травня 2021 року). Львів : ГО «Львівська педагогічна спільнота», 2021. С. 65–72.

the state of health as a priority for participants in preschool education, which is essential for forming a healthy younger generation, and the insufficient methodological support available to pedagogical staff in creating such an environment; progressive trends in parents' understanding of the importance of preschool education for preserving and strengthening children's health, and the lack of targeted activity among preschool specialists in seeking effective technologies"[14]. Another significant contradiction, in our view, lies between the real needs of preschoolers and the commonly used tools of the educational process. To overcome this, a distinct direction – *health-preserving education* – was developed, based on the principle of prioritizing health as a core component of personality. This approach ensures optimal vital activity for both teachers and pupils. Health, as the basis of human life, is a complex, multi-level phenomenon encompassing physiological, psychological, social, and pedagogical dimensions. The pedagogical dimension is understood as the formation of a healthy lifestyle beginning in early childhood[15].

The category "health-preserving environment" is currently interpreted in various ways, for example: "as a set of managerial, organizational, educational, and upbringing conditions aimed at preserving, forming, and strengthening all types of child health (physical, mental, spiritual, and social); as a set of social and hygienic, psychological and pedagogical conditions, and physiological factors that contribute to the realization of adaptive capabilities, the preservation and strengthening of pupils' physical and mental health, and the harmonious development of personality; as a correctional, developmental, and rehabilitation space employing personality-oriented technologies"[16].

According to scholars, "a health-preserving environment is one in which it is pleasant and safe for a child to be, which stimulates development, provides comfortable conditions for health formation, and is optimal for growth. It involves the use of diverse means and methods of educational influence, taking into account children's needs, interests, individual characteristics, and potential, while applying a personality-oriented approach"[17].

---

[14] Калічак Ю. Л., Посацький О. В. Психолого-педагогічні критерії готовності педагогів дошкільного профілю до застосування здоров'язбережувальних технологій. *Суспільство та національні інтереси.* : журнал. 2024. № 6 (6) 2024. С. 80–91.

[15] Kalichak Yu. L., Bondaruk R. I. Pedagogical conditions for creating a health-preserving environment in kindergarten. *Соціально-гуманітарний вісник* : збірник наукових праць. Вип. 62. Харків : СГ НТМ «Новий курс», 2025. С. 38–39.

[16] Калічак Ю. Л. Формування здоров'язбережувальної компетентності вихователя закладів дошкільної освіти в контексті професійної підготовки. Системні трансформації України та світу: історія та сучасність : колективна монографія. Харків : СГ НТМ «Новий курс», 2024. С. 58–70.

[17] Чомко І. В., Калічак Ю. Л. Значення здоров'язбережувальних технологій в роботі з дошкільниками. Дослідження різних напрямів розвитку психології та педагогіки : зб. наук. робіт учасників між нар. наук.-практ. конф. (19–20 листопада 2021 р., м. Одеса). Одеса : ГО «Південна фундація педагогіки», 2021. С. 79–83.

The main factors of health-preserving activity for modern educators are considered to be: "constant monitoring of changes in preschoolers' health; the ability to design individual health-preserving programs for each child; the capacity to maximize the use of all necessary elements of a health-preserving environment; the ability to quickly master effective health-preserving technologies and methods; and the ability to foster strong internal motives for health-preserving behavior in children"[18].

Each preschool institution possesses unique potential, given the wide range of available "health-preserving technologies (fairy-tale therapy, stretching, fitball gymnastics, finger gymnastics, psychogymnastics, breathing exercises, kinesoreflexotherapy, aromatherapy and phytotherapy, oxygen drinks, color therapy, massage techniques, game-based training, etc.)"[19].

In our view, a conscious attitude toward health can be cultivated through "folk mobile games, didactic and role-playing games, independent work, exploratory activities, and constant health monitoring. Optimization of this process is facilitated by modern innovative pedagogical technologies (humanistic approaches, pedagogical cooperation, and free choice), as well as active teaching and upbringing methods"[20].

To maximize the positive impact of health promotion alongside the existence of a health-preserving environment, the following "measures can be recommended: planned and carefully designed physical activity; frequent exposure to fresh air; adherence to hardening procedures and personal hygiene; rational nutrition; active rest and sufficient sleep; active exploration of the world; expression of positive emotions and friendly attitudes; the ability to conduct observations and generalize results; respect for nature, people, and all living and non-living things; friendly relations; and awareness of the need for motivation to preserve one's own health"[21].

In our opinion, respect for one's own health is instilled through the acquisition of "skills such as positive thinking, friendly relationships, cultural

---

[18] Калічак Ю. Л., Семкович Х. І. Передумови формування валеологічного світогляду дітей дошкільного віку. The XX International Scientific and Practical Conference *"Problems of science and practice, tasks and ways to solve them"*, May 24–27, 2022, Warsaw, Poland. P. 503–509.

[19] Калічак Ю. Л. Здоров'язбережувальне розвивальне середовище сучасного ЗДО: психологічний контекст. *Пріоритетні напрями модернізації освіти: досвід, реалії, перспективи* : збірник наукових праць Всеукраїнської наук.-практ. конф. (Дрогобич, 7–8 квітня 2022 р.) / за ред. М. Чепіль, А. Федорович. Дрогобич : РВВ Дрогобицького державного педагогічного університету ім. І. Франка, 2022. С. 119–123.

[20] Калічак Ю.Л., Долішняк Н.В. Вплив родини на формування здорової особистості дитини дошкільного віку. *Сучасні виклики та актуальні проблеми науки, освіти, технологій і суспільства* : зб. тез доповідей міжнародної наук.-практ. конф. (Ізмаїл, 6 жовтня 2023 р.) : у 2 ч. Ізмаїл : ЦФЕНД, 2023. Ч. 1. С. 15–16.

[21] Калічак Ю. Л. Оздоровчі технології та діагностичні методики фізичного розвитку дітей : тексти лекцій. Дрогобич : РВВ Дрогобицького державного педагогічного університету ім. І. Франка, 2016. 128 с.

and hygienic habits developed through games, work, and independent activities, as well as carefully selected educational tools. A conscious and responsible attitude toward health enables the formation of appropriate knowledge, health-preserving inclinations, and interests, taking into account all components of health (spiritual, mental, physical, and social). Ensuring this requires constant pedagogical influence. Errors in forming children's responsible attitudes toward their own health may lead to its loss"[22].

According to N. F. Denisenko, "a modern educator first of all needs knowledge that will help form in preschoolers a conscious attitude toward their health, encourage them to participate in personal improvement, and contribute to the formation of life competence in the areas: *'I-physical,' 'I-mental,' 'I-social,' 'I-spiritual'*"[23].

To achieve this, educators must master the following "skills: detailed planning of health-preserving activities for toddlers; selection of diverse forms of health-improving activities such as special exercises, hardening procedures, massage, psychocorrectional work, vitamin therapy, aromatherapy, etc.; organization of independent motor activity for children; appropriate selection of pedagogical tools; implementation of educational and advisory work with parents; adequate regulation of physical activity; application of various hardening procedures; and the ability to create a favorable regime for sick children, taking into account their physical development, health status, and medical recommendations"[24].

Based on the analysis of these requirements, the priority task of the educator is, in our view, "the formation of a proper attitude toward health and a sense of responsibility in preschoolers. The creation of an effective, rather than formal, health-preserving environment aimed at preserving and strengthening the health of preschool children will contribute to the acquisition of elementary knowledge about a healthy lifestyle and the effective assimilation of its main elements. This path will guarantee the good health of younger generations, stimulate their creativity, and support the process of self-realization"[25].

---

[22] Мотика А., Калічак Ю. Нетрадиційні види гімнастики як елемент здоров'язбережувального середовища у закладах освіти. *Сучасні тенденції створення здоров'язбережувального середовища у закладах освіти* : збірник наукових праць / ред кол. Ю. Калічак (головний редактор) та ін. Дрогобич : Дрогобицький державний педагогічний університет імені Івана Франка, 2025. Випуск 4. С. 85–93.

[23] Закон України «Про дошкільну освіту». URL: https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/2628-14#Text.

[24] Калічак Ю. Л. Передумови реалізації перспектив України у міжнародному співтоваристві: цивілізаційний поступ у системі дошкільної освіти. The International Community and Ukraine in the Processes of Economic and Civilizational Progress: Current Economic-Technological, Resource, Institutional, Security and Socio-Humanitarian Problems : Scientific monograph. Riga, Latvia : Baltija Publishing, 2024. С. 511–530.

[25] Михайліченко Т. Модель фізкультурно-оздоровчої роботи у дошкільному закладі. Вихователь-методист дошкільного закладу. 2010. № 4. С. 44–54.

3. Practical recommendations for teachers

Preschool teachers should motivate children daily by providing theoretical knowledge about "health" as the most important life value. Energy and cheerfulness are essential for children to remain active, play diverse games without fatigue, and avoid illness. It is well known that diseases, low mood, and reduced intellectual or physical performance can lead to developmental delays and academic failure. Therefore, every preschooler must learn to care for their own health, understand basic morpho-functional indicators of the body, acquire elementary methods of self-care, and avoid harmful habits.

It is also beneficial to familiarize children with the anatomical features of the human body, its organs, and systems. Using accessible visual aids and illustrations, teachers can explain the general anatomical structure and physiological processes, as well as the functioning of major systems (cardiovascular, musculoskeletal, respiratory, digestive, circulatory, etc.). For example, when discussing the circulatory system, preschoolers may listen to their own heartbeat and learn how it functions as a powerful pump circulating blood throughout the body. They can observe how the heartbeat accelerates during physical exertion and slows at rest, demonstrating the economization of the heart's work. Demonstrations on the child's own body before and after exercise provide vivid illustrations of these processes.

The purpose of assimilating such information is not only to understand bodily functions but also to develop the ability to listen to one's own body, maintain proper rhythms, and respond appropriately to natural signals such as hunger, thirst, fatigue, or the need for sleep and fresh air.

During the daily routines of preschool institutions, constant monitoring of children's well-being and awareness of internal processes – such as hunger, thirst, or fatigue – is essential. Teachers should teach children appropriate responses to discomfort (eating, drinking, resting, or changing activities). To this end, various forms of motor activity should be employed, including "morning hygienic gymnastics; physical development classes; short physical activity breaks; exercises after daytime sleep; outdoor games; sports-related entertainment; and thematic events such as physical education holidays and health days"[26].

Among modern trends in preschool activities – and sometimes questionable fashions among parents – are "visiting sports sections; swimming lessons; private preschool classes; tutoring in individual subjects; and attendance at

[26] Богініч О. Л. Сутність здоров'язберігаючого середовища у життєдіяльності дітей дошкільного віку. Вісник Прикарпатського університету. Педагогіка. Випуск XVII–XVIII. Івано-Франківськ, 2008. С. 191–199.

child development centers"[27]. A positive aspect of these activities is their shared goal of instilling basic rules of safe behavior and the foundations of a healthy lifestyle.

Physical education classes in preschool must avoid coercion and monotony, instead employing emotionally engaging methods such as musical accompaniment, role-based movement, and brightly colored equipment. "Emphasis should be placed on the beauty and harmony of the human body, with the natural outcome of classes being positive emotions and enjoyment of physical activity"[28].

The most ambitious goals of a well-organized health-preserving environment are instilling the values of a healthy lifestyle, fostering awareness of the practical benefits of physical activity, and ensuring adherence to personal hygiene. Children often remember the specific purpose of exercises for developing particular muscles or supporting bodily systems, especially when teachers consistently maintain a positive emotional atmosphere.

To strengthen internal values of a healthy lifestyle, teachers should hold discussions with children about preventive measures against disease, including "hardening techniques; respiratory gymnastics; air and sun baths; vitamin therapy; phytotherapy; physiotherapy procedures; massage; and corrective gymnastics"[29].

The systematic application of these recommendations helps children recognize themselves as active participants in health-preserving procedures, understand their purpose, and appreciate their benefits. Since preschoolers often cannot clearly articulate the causes of illness or describe symptoms, they must be taught to communicate effectively with adults and medical professionals – explaining what hurts, how long symptoms have persisted, and where pain is localized.

For this purpose, role-playing games can be organized in preschool settings, using dolls, soft toys, and simple equipment. "In such activities, children take on the roles of both patient and doctor, practicing relevant vocabulary and imitating medical actions"[30].

---

[27] Гаращенко Л. В. Педагогічні умови застосування здоров'язбережувальних методик виховання в дошкільному закладі. *Збірник наук. пр. Київського університету ім. Б. Грінченка*. 2010. Частина 4. С. 27–34.

[28] Калічак Ю. Л. Формування культури здоров'я дітей дошкільного віку: превентивний аспект. Public health system in Ukraine and EU countries: realities, transformation, development vectors, perspectives : scientific monograph. Riga, Latvia : Baltija Publishing, 2024. P. 561–585.

[29] Калічак Ю. Л. Здоров'язбережувальна складова підготовки фахівців дошкільного профілю. Україна та світ: виміри сьогодення : колективна монографія. Харків : СГ НТМ «Новий курс», 2024. С. 37–49.

[30] Kalichak Yu. L. Contents of Preschool Profile Specialist Training. Health Care Aspect. Annales Universitat is Mariae Curie-Skłodowska Lublin–Polonia. Sectio J. Vol. XXXVII, 2 2024. P. 73–88.

From an early age, children must be guided by basic knowledge about medicines – their benefits, their role in combating harmful microbes, and the importance of strengthening the body's defenses. They should also be taught precautionary measures and the real dangers of improper medication use. Children must learn certain rules: medicines are taken only as prescribed by a doctor, only in the presence of adults, and it is strictly forbidden to use or experiment with medicines belonging to others.

Organizing a balanced diet in preschool involves teaching children the benefits of vitamins, their importance for bodily functions, and the close relationship between health and nutrition quality. Children should understand the advantages of eating fresh fruits and raw vegetables, the role of mineral salts and trace elements for bones, teeth, and blood, and the harms of excessive consumption of sweets.

The duties of preschool teachers include familiarizing children with basic first aid rules for injuries and painful conditions (burns, bites, wounds, etc.). Self-help techniques can be effectively taught through special conversations, dramatization games, and role-playing in puppet theater settings.

Valeological education during preschool childhood is particularly significant, as this sensitive period shapes children's first experiences of feelings, habits, and behavioral skills. These experiences initiate attitudes toward the environment, peers, and themselves as part of the wider universe. It is precisely during this stage that ideas about a healthy lifestyle are most effectively formed. Timely instilling of healthy lifestyle norms provides a solid foundation for lifelong health. In this way, structured work on forming healthy habits in preschoolers becomes a social mandate, fostering individuals with a conscious attitude toward health and the ability to establish harmonious relationships with the environment.

The primary responsibility in preschool education lies with teachers and families. They play the central role in shaping children's ideas about a healthy lifestyle and directly participate in the educational process. The deep knowledge of preschool specialists and parents, their established health-preserving values, personal example, and awareness of the importance of timely guidance form the basis for developing healthy lifestyles in preschoolers. Accordingly, the ascertaining experiment clarified the level of knowledge about healthy lifestyle basics among teachers and parents. Interviews were conducted, questionnaires were distributed, and pedagogical documentation and regulatory acts governing preschool institutions were examined in detail.

The research highlighted several generalizations: consensus on the need to instill healthy lifestyle habits in preschoolers; immediacy and interest in the issue; the importance of creating appropriate conditions for lifestyle formation;

the significance of health-preserving orientation in the educational process; priority of observing daily routines; timeliness and quality of nutrition; support for motor activity; "careful monitoring of physical development; and the importance of mastering cultural and hygienic skills"[31].

Observations and discussions with teachers revealed strong awareness of the need to prioritize healthy lifestyle formation and cultural-hygienic skills in preschoolers. This awareness supports the organization of scientific-methodological and practical seminars, round tables, and other effective forms of collaboration with parents.

Analysis of current psychological and pedagogical research on the advantages and disadvantages of preschoolers' acquisition of healthy lifestyle concepts in preschool and family contexts has led to the identification of priority measures. These include: organizing special classes for older preschoolers to develop established ideas about healthy living through bio-social and ecological-valeological information (e.g., environmental pollution from industry, transport, and waste, and its negative impact on health and lifestyle); organizing conversations, observations, excursions, and outdoor games to consolidate theoretical knowledge; and conducting methodological activities with teachers and parents.

The main principles of such activities "are: reliability (information must be based on scientific facts); accessibility (adaptation of information to the age of older preschoolers, clarity in presentation); maximum visualization (bright, engaging examples that stimulate emotional intelligence and genuine interest, including poetic texts, Ukrainian folklore, and aphorisms of notable figures); systematic organization of the learning process with developmental and educational orientation; mandatory use of the subject-subject model of interaction between adults and preschoolers; and ensuring children's awareness of the necessary ideas about a healthy lifestyle"[32].

The system of measures described above must take into account the specific features of older preschoolers' cognitive activity. Their learning should focus on clarifying the relationships and interdependence between health and lifestyle, as well as the influence of the socio-ecological environment on maintaining

[31] Kalichak Yu. Health-Protecting Psychologically Safe Developmental Environment of a Preschool Educational Institution. The problems of formation of the healthy modus vivendi of students of higher education establishments in the sphere of health protection. Human health: realities and prospects. Monographic series. Volume 4. Health and Biosensors. / Edited by N. Skotna, S. Voloshanska, T. Kavetskyy, O. Smutok, M. Gonchar. Drohobycz : Posvit, 2019. P. 230–237.

[32] Калічак Ю. Л. Здоров'язбережувальне розвивальне середовище сучасного ЗДО: психологічний контекст. *Пріоритетні напрями модернізації освіти: досвід, реалії, перспективи* : зб. наук. праць Всеукраїнської наук.-практ. конференції (Дрогобич, 7–8 квітня 2022 року) / за ред. М. Чепіль, А. Федорович. Дрогобич : РВВ Дрогобицького державного педагогічного університету імені Івана Франка, 2022. С. 119–123.

a healthy lifestyle. This should be presented at a level accessible to children, primarily activating their thinking processes.

Equally important, in our view, is a comprehensive approach to selecting and adapting the theoretical material used with children. This material should address the elements of maintaining a healthy lifestyle. Compliance with this condition will foster integrity and systematic understanding in preschoolers, helping them grasp the dependence of health on the state of their immediate social and ecological environment.

The necessary conditions for effectively forming ideas about a healthy lifestyle include "systematic consideration of the age characteristics of older preschoolers (the figurative nature of children's worldview and thinking operations); the ability to generalize and systematize acquired information; perseverance in the process of creating these ideas during classes; and a comprehensive approach to using diverse educational methods"[33].

Parent meetings, consultations, thematic seminars, and workshops are among the most effective forms of communication between preschool teachers and parents. Joint participation in listening and active discussion of issues related to forming healthy lifestyle concepts in preschoolers enables parents to compare their child's development with peers and to learn from progressive family education practices[34].

To promote children's spiritual, physical, emotional, and social development, psychologists recommend creating a healthy environment in preschool institutions and family settings. Such an environment should include "a combination of fresh air, healthy nutrition, and systematic physical activity; constant communication with the child to show genuine interest in their life, thoughts, and feelings, as well as providing support and understanding; strict adherence to the daily routine; encouragement of healthy habits (brushing teeth, washing hands, observing hygiene rules); joint physical exercises and walks; benevolence and openness in communication; and consistent demonstration of a healthy lifestyle by adults"[35].

---

[33] Калічак Ю. Л., Долішняк Н. В. Формування ціннісних орієнтацій здоров'язбереження дошкільників. *Впровадження сучасних технологій в процесі забезпечення якісної підготовки майбутніх фахівців дошкільної освіти* : збірник наукових праць / укладачі : Мисик О. С., Миськова Н. М., Онофрійчук Л. О., Пісоцька Л. С., Розгон В. В. ; за заг. ред. проф. Зданевич Л. В. Хмельницький : ХГПА, 2024. С. 256–260.

[34] Kalichak U. Yu., Kalichak Yu. L. Creation of health preserving environment in modern preschools. Створення здоров'язбережувального середовища в сучасних дошкільних навчальних закладах. *Психологія та педагогіка: необхідність впливу науки на розвиток практики в Україні* : збірник тез наукових робіт учасників міжнародної науково-практичної конференції (м. Львів, 26–27 лютого 2021 року). Львів : ГО «Львівська педагогічна спільнота», 2021. С. 109–117.

[35] Семкович Х. І., Калічак Ю. Л. Передумови формування здоров'язбережувального освітнього середовища закладу дошкільної освіти. *Наука, освіта та суспільство в XXI столітті: наукові ідеї та механізми реалізації* : збірник тез доповідей міжнародної науково-практичної конференції (Кропивницький, 19 листопада 2022 р.) : у 2 ч. Кропивницький : ЦФЕНД, 2022. Ч. 1. С. 34–36.

For a long time, scientific research on preschool children's health emphasized physical education, hardening procedures, hygiene and sanitation, cultural and hygienic skills, and rational nutrition[36]. However, the child, as a subject of valeological education in preschool institutions, requires objective assessment as an active participant in the pedagogical process. The main indicators determining the effectiveness of valeological education include age, initial level of valeological knowledge and skills, time spent in preschool, and current health status.

Practical valeology is typically associated with hygiene, physical education, rational nutrition, and psychotherapy. Yet there is a need to expand the forms and methods of work to include valeological educational activities and simple experiments accessible to preschoolers, clarifying the general principles of bodily systems.

Equally important is the search for effective ways to form children's internal motivation to lead a healthy lifestyle and to instill value-based attitudes toward preserving and strengthening health[37].

According to some authors, preschool education today requires filling the main areas of work with valeological content, creating functional daily routines for children of different ages, and ensuring conditions for full motor activity. The work of medical staff requires significant support, speech therapy centers need optimization, and special forms of work should be developed to support preschoolers' emotional and mental health[38].

In senior preschool age, healthy lifestyle education is implemented through clear awareness of health-preserving norms and rules, and through the formation of "convictions regarding the need to preserve and strengthen health, and recognition of the dependence of health status on lifestyle. Under the influence of pedagogical actions, children begin to pay more attention to information about a healthy lifestyle. At this age, the volume and depth of knowledge increase, and concepts about the influence of negative factors on the human body are formed more effectively"[39].

Among the main tasks of preschool teachers, we emphasize "the following: the formation of health-preserving competence in preschool children; monitoring of the latest scientific research in health-preserving technologies; analysis of innovative experience in creating health-preserving environments in preschool

[36] Апанасенко Г. Л., Попова Л. А. Валеологія як наука. *Валеологія.* 2016. № 1. С. 4–9.

[37] Геращенко Л. Заняття з фізичної культури в дошкільному закладі: здоров'язбережувальний аспект. Імідж сучасного педагога. 2010. № 6–7 (105–106). С. 101–103.

[38] Бєлєнька Г. В. Здоров'я дитини – від родини : монографія. Київ, 2006. 220 с.

[39] Великий тлумачний словник сучасної української мови : 250000 / укладач та головний редактор В. Т. Бусел. Київ ; Ірпінь : Перун, 2005. VIII, 1728 с.

institutions; teaching children about the structure of the body and the functions of internal organs; familiarizing them with the need to protect eyesight, hearing, posture, skin, and other organs; instilling public and personal hygiene skills (cleanliness of hands, face, hair, clothing, etc.); developing awareness of disease symptoms and prevention methods; systematic promotion of healthy lifestyles and safe behavior; familiarization with natural and social factors that positively affect health (sound sleep, fresh air, rational nutrition, hygiene, exercise) and negatively affect health (poor nutrition, prolonged screen time, bad habits, irregular routines); fostering positive attitudes toward anthropometry, medical examinations, and vaccinations; and creating conditions for children to actively apply their knowledge in play, visual, speech, theatrical, research, labor, and other activities"[40].

CONCLUSIONS

A thorough analysis of psychological and pedagogical literature on health preservation allows us to make the following generalizations: the traditions of raising a healthy child originate in preschool childhood and depend on the environment, as well as on children's awareness of the importance of relationships in modern society for nurturing a healthy generation.

The natural and social environment directly shapes the foundations of health culture, ensuring that preschool children develop a conscious attitude toward their own health, adhere to the basics of a healthy lifestyle, and acquire value-based ideas about health from an early age.

In general, the formation of valeological values in preschoolers is an important prerequisite for establishing a culture of health in preschool education. It fosters children's respectful attitude toward their own well-being, the development of essential health-preserving skills, and broad participation in cultural and health-improving activities involving their families.

Educational and promotional work in preschool institutions (lectures, conversations, consultations, etc.) is a vital component of creating a health-preserving environment.

In the current realities of life, preschool education is compelled to perform new functions that meet the cultural and health-related needs of modern children and parents. Today's challenges demand innovative approaches to creating health-preserving environments and effective transformation of preschool staff to implement health-preserving practices successfully.

[40] Калічак Ю. Л., Долішняк Н. В. Влив родини на формування здорової особистості дитини дошкільного віку. *Сучасні виклики та актуальні проблеми науки, освіти, технологій і суспільства* : збірник тез доповідей міжнародної науково-практичної конференції (Ізмаїл, 6 жовтня 2023 р.) : у 2 ч. Ізмаїл : ЦФЕНД, 2023. Ч. 1. С. 15–16.

It is crucial that the health of preschoolers becomes a natural outcome of the educational process, with the establishment of a health-preserving environment as its initial link. Health is regarded as a powerful resource for achieving life goals, performing duties systematically and effectively, recovering quickly, and maintaining high levels of mental and physical performance over time.

Mastering elementary valeological values will, in our view, contribute to the humanization of interpersonal relationships among participants in preschool education.

The recommendations formulated for teachers not only enrich their professional experience in the field of health culture but also create the necessary conditions for ensuring health-preserving competence.

The survey of parents provides grounds for the following generalizations: the vast majority support the creation of a health-preserving environment in preschool institutions; only a minority show interest in the latest scientific publications on health preservation; most respondents approve of organizing special events in preschools to foster basic ideas about health-preserving technologies; many parents respond positively to health-preserving initiatives in preschools; one-third of respondents do not associate children's health with increased activity; and the majority strive to adhere to a healthy lifestyle, influencing their children's awareness through personal example.

The formation of a value-based attitude toward health and the assimilation of various preservation technologies significantly broadens preschoolers' perception of health-preserving values. It enhances the level of health culture, supports the development of personal traits, and invigorates the health-related efforts of families, thereby improving the overall health of children.

SUMMARY

The harmful impact of man on nature, ignoring the laws of nature negatively affect the health of preschool children. The main reasons are difficult socio-economic living conditions; unbalanced nutrition; neglect of sanitary and hygienic requirements for raising children, low level of physical activity.

As a way out of this situation, the creation of a health-preserving environment is proposed, which would eliminate such negative impacts. Its organization requires knowledge of pedagogy, pediatrics, physiology, hygiene, psychology, human ecology, sociology, etc.

Kindergarten teachers motivate children every day, providing theoretical knowledge about "health" as the most important life value. Energy and cheerfulness are necessary for children to remain active, play various games without getting tired and avoid diseases. It is well known that diseases, bad mood, decreased intellectual or physical performance can lead to developmental

delay and academic failure. Therefore, every child should learn to take care of their own health, be able to assess the state of the body, master elementary self-care methods and avoid bad habits.

Physical education classes in kindergarten are held without coercion and monotony, instead they involve the use of emotional methods, such as musical accompaniment, role-playing movements and bright colors of equipment. Special emphasis is placed on the beauty and harmony of the human body, positive emotions after classes and pleasure from physical activity, instilling the values of a healthy lifestyle, awareness of the practical benefits of physical activity and ensuring compliance with personal hygiene.

Organizing a balanced diet in kindergarten involves explaining to children the role of vitamins, their importance for the body and the close connection between health and quality of nutrition. Children should understand the benefits of fresh fruits and raw vegetables, the role of mineral salts and trace elements for bones, teeth and blood, as well as the harm of excessive consumption of sweets.

Teachers and the family are responsible for the child's health. They form children's ideas about a healthy lifestyle and participate in the educational process. Deep knowledge of adults, their formed values of health preservation, personal example create the basis for the development of a healthy lifestyle in preschool children.

The study provides grounds to assert: the need to instill healthy lifestyle habits in children; the relevance and interest of the state and society in this issue; the importance of creating appropriate conditions for the formation of a healthy lifestyle; the importance of a health-preserving orientation in the educational process; the priority of observing the daily regimen; the quality of food products; stimulation of motor activity; careful control of the level of physical development; the importance of mastering cultural and hygienic skills.

Means of achieving the result: organization of special classes for senior preschoolers in order to develop established ideas about a healthy lifestyle through biosocial and ecological-valeological information (for example, environmental pollution by industry, transport and waste, and its negative impact on health and lifestyle); organization of conversations, observations, excursions and games in the fresh air to consolidate theoretical knowledge; conducting methodological activities with teachers and parents.

A comprehensive approach to the selection and adaptation of theoretical material used in working with children in order to form a healthy lifestyle is necessary. Compliance with this condition will contribute to the development of integrity and systematicity in preschoolers, helping them to realize the dependence of health on the state of their immediate social and ecological environment.

Parent meetings, consultations, thematic seminars and master classes are among the most effective forms of communication between kindergarten teachers and parents. Joint participation in listening and active discussion of issues related to the formation of ideas about a healthy lifestyle in preschoolers allows parents to compare their child's development with peers and learn from progressive family upbringing practices.

The spiritual, physical, emotional and social development of preschool children involves the creation of a healthy environment in kindergartens and family settings. Such an environment should include being outdoors, healthy eating, physical activity; constant communication with the child, adherence to a daily routine; encouraging healthy habits (brushing teeth, washing hands, observing hygiene rules); joint physical exercises and walks; friendliness and openness in communication; and a personal example of adults.

It is important to find effective ways to form children's internal motivation for a healthy lifestyle and instill values for preserving and strengthening health. Modern preschool education requires filling the main areas of work with valeological content, creating a favorable daily routine for the child, and a variety of physical activity. The work of medical staff needs significant support, speech therapy centers need optimization, and special forms of work should be developed to support the emotional and mental health of preschool children.

Tasks of kindergarten teachers: formation of health-preserving competence in preschool children; monitoring of the latest scientific research in the field of health-preserving technologies; analysis of innovative experience in creating a health-preserving environment in educational institutions; mastering hygiene skills; awareness of prevention methods; systematic promotion of a healthy lifestyle and safe behavior; sound sleep, fresh air, rational nutrition, hygiene, physical exercise, elimination of bad habits, irregular daily routine.

Formation of a value attitude towards health and mastering various preservation technologies significantly expands preschoolers' ideas about health-preserving values, ensures a high level of health culture, and promotes personal development.

Bibliography

1. Андрющенко Т. К. Аксіологічний аспект проблеми формування здоров'язбережувальної компетентності в дітей дошкільного віку. *Нова педагогічна думка.* Рівне. 2013. № 1. С. 78–81.

2. Апанасенко Г. Л., Попова Л. А. Валеологія як наука. *Валеологія*. 2016. № 1. С. 4–9.

3. Базовий компонент дошкільної освіти (Державний стандарт дошкільної освіти) : нова редакція. Затверджено Наказом Міністерства освіти і науки України від 12.01.2021 р. № 33. Київ : [Б. в.], 2021. 30 с.

4. Богініч О. Л. Сутність здоров'язберігаючого середовища у життєдіяльності дітей дошкільного віку. *Вісник Прикарпатського університету. Педагогіка.* Випуск XVII–XVIII. Івано-Франківськ, 2008. С. 191–199.

5. Великий тлумачний словник сучасної української мови : 250000 / укладач та головний редактор В. Т. Бусел. Київ; Ірпінь : Перун, 2005. VIII, 1728 с.

6. Вільчковський Е. С., Курок О. І. Теорія і методика фізичного виховання дітей дошкільного віку : підручник. Суми : ПФ Видавництво «Університетська книга». 2019. 467 с.

7. Гаращенко Л. В. Педагогічні умови застосування здоров'язбережувальних методик виховання в дошкільному закладі. *Збірник наукових праць Київського університету імені Бориса Грінченка*. 2010. Частина 4. С. 27–34.

8. Гаращенко Л. В. Цінність здоров'я дітей дошкільного віку як чинник гуманістичного виховання. *Педагогічний процес: теорія і практика*. 2013. Вип. 2. С. 29–37.

9. Калічак Ю. Л. Здоров'язбережувальна складова підготовки фахівців дошкільного профілю. Україна та світ: виміри сьогодення : колективна монографія. Харків : СГ НТМ «Новий курс», 2024. С. 37–49.

10. Калічак Ю. Л. Здоров'язбережувальне розвивальне середовище сучасного ЗДО: психологічний контекст. *Пріоритетні напрями модернізації освіти : досвід, реалії, перспективи* : збірник наукових праць Всеукраїнської науково-практичної конференції (Дрогобич, 7–8 квітня 2022 року) / за редакцією М. Чепіль, А. Федорович. Дрогобич : Редакційно-видавничий відділ Дрогобицького державного педагогічного університету імені Івана Франка, 2022. С. 119–123.

11. Калічак Ю. Л. Педагогічні умови створення здоров'язбережувального середовища закладу дошкільної освіти. *Advanced top technology* : електронний науковий журнал № 3. Харків : СГ НТМ «Новий курс», 2024. С. 58–59.

12. Калічак Ю. Л. Передумови реалізації перспектив України у міжнародному співтоваристві: цивілізаційний поступ у системі дошкільної освіти. The International Community and Ukraine in the Processes of Economic and Civilizational Progress: Current Economic-Technological, Resource, Institutional, Security and Socio-Humanitarian Problems : Scientific monograph. Riga, Latvia : Baltija Publishing, 2024. С. 511–530.

13. Калічак Ю. Л. Формування здоров'язбережувальної компетентності вихователя закладів дошкільної освіти в контексті професійної підготовки. Системні трансформації України та світу: історія та сучасність : колективна монографія. Харків : СГ НТМ «Новий курс», 2024. С. 58–70.

14. Калічак Ю. Л. Формування здоров'язбережувальної компетентності вихователів внаслідок вивчення курсу «Оздоровчі технології та діагностичні методики фізичного розвитку дітей дошкільного віку». *Наукові інновації та передові технології*. 2022. № 1(3). С. 234–243.

15. Калічак Ю. Л. Формування культури здоров'я дітей дошкільного віку: превентивний аспект. Public health system in Ukraine and EU countries: realities, transformation, development vectors, perspectives : scientific monograph. Riga, Latvia : Baltija Publishing, 2024. P. 561–585.

16. Калічак Ю. Л., Бац Р. М., Кичма В. П. Сучасні підходи до створення здоров'язбережувального середовища закладу дошкільної освіти. *Advanced top technology* : електронний науковий журнал № 1. Харків : СГ НТМ «Новий курс», 2024. С. 5–7.

17. Калічак Ю. Л., Долішняк Н. В. Влив родини на формування здорової особистості дитини дошкільного віку. *Сучасні виклики та актуальні проблеми науки, освіти, технологій і суспільства* : збірник тез доповідей міжнародної науково-практичної конференції (Ізмаїл, 6 жовтня 2023 р.) : у 2 ч. Ізмаїл : ЦФЕНД, 2023. Ч. 1. С. 15–16.

18. Калічак Ю. Л., Долішняк Н. В. Формування ціннісних орієнтацій здоров'язбереження дошкільників. *Впровадження сучасних технологій в процесі забезпечення якісної підготовки майбутніх фахівців дошкільної освіти* : збірник наукових праць / укладачі : Мисик О. С., Миськова Н. М., Онофрійчук Л. О., Пісоцька Л. С., Розгон В. В. ; за заг. ред. проф. Зданевич Л. В. Хмельницький : ХГПА, 2024. С. 256–260.

19. Калічак Ю. Л., Дрогомирецька Н. Т. Особливості використання здоров'язбережувальних технологій в роботі з дошкільниками. *Наука, освіта та суспільство в XXI столітті: наукові ідеї та механізми реалізації* : збірник тез доповідей міжнародної науково-практичної конференції (Кропивницький, 19 листопада 2022 р.) : у 2 ч. Кропивницький : ЦФЕНД, 2022. Ч. 1. С. 18–21.

20. Калічак Ю. Л., Посацький О. В. Психолого-педагогічні критерії готовності педагогів дошкільного профілю до застосування здоров'язбережувальних технологій. *Суспільство та національні інтереси* : журнал. 2024. № 6 (6) 2024. С. 80–91.

21. Калічак Ю. Л., Семкович Х. І. Передумови формування валеологічного світогляду дітей дошкільного віку. The XX International

Scientific and Practical Conference “Problems of science and practice, tasks and ways to solve them”, May 24–27, 2022, Warsaw, Poland. P. 503–509.

22. Калічак Ю. Л., Семкович Х. І. Передумови формування валеологічного світогляду дітей дошкільного віку. The XX International Scientific and Practical Conference *“Problems of science and practice, tasks and ways to solve them”*, May 24–27, 2022, Warsaw, Poland. P. 503–509.

23. Калічак Ю. Л., Семкович Х. І. Передумови формування ціннісного ставлення до власного здоров’я дошкільників. *Наука, освіта та суспільство в XXI столітті: наукові ідеї та механізми реалізації* : збірник тез доповідей міжнародної науково-практичної конференції (Кропивницький, 19 листопада 2022 р.) : у 2 ч. Кропивницький : ЦФЕНД, 2022. Ч. 1. С. 22–25.

24. Калічак Ю. Л., Чомко І. В. Передумови створення здоров’язбережувального середовища у закладі дошкільної освіти. *Сучасні виклики та актуальні проблеми науки, освіти, технологій і суспільства* : збірник тез доповідей міжнародної науково-практичної конференції (Ізмаїл, 6 жовтня 2023 р.) : у 2 ч. Ізмаїл : ЦФЕНД, 2023. Ч. 1. С. 16–18.

25. Калічак Ю. Л., Чомко І. В. Роль здоров’язбережувальних педагогічних технологій у створенні здоров’язбережувального середовища закладу загальної середньої освіти. *Нотатки сучасної науки* : електронний мультидисциплінарний науковий часопис. № 15. Харків : СГ НТМ «Новий курс», 2024. С. 75–76.

26. Калічак Ю. Л. Нові можливості інтеграції системи дошкільної освіти України у європейський освітній простір. *Науковий часопис Національного педагогічного університету імені М. П. Драгоманова*. Серія № 5. *Педагогічні науки: реалії та перспективи*. Спецвипуск. Том 1. Київ : Видавничий дім «Гельветика», 2022. С. 105–110.

27. Калічак Ю. Л. Оздоровчі технології та діагностичні методики фізичного розвитку дітей : тексти лекцій. Дрогобич : Редакційно-видавничий відділ Дрогобицького державного педагогічного університету імені Івана Франка, 2016. 128 с.

28. Калічак Ю. Л., Долішняк Н. В. Вплив родини на формування здорової особистості дитини дошкільного віку. *Сучасні виклики та актуальні проблеми науки, освіти, технологій і суспільства* : збірник тез доповідей міжнародної науково-практичної конференції (Ізмаїл, 6 жовтня 2023 р.) : у 2 ч. Ізмаїл : ЦФЕНД, 2023. Ч. 1. С. 15–16.

29. Мотика А., Калічак Ю. Нетрадиційні види гімнастики як елемент здоров’язбережувального середовища у закладах освіти. *Сучасні тенденції створення здоров’язбережувального середовища у закладах освіти* : збірник наукових праць / ред кол. Ю. Калічак (головний редактор) та ін.

Дрогобич : Дрогобицький державний педагогічний університет імені Івана Франка, 2025. Випуск 4. С. 85–93.

30. Сварковська Л. Оздоровлюємо дітей разом з батьками. *Вихователь-методист дошкільного закладу.* 2011. № 6. С. 49–56.

31. Семкович Х. І., Калічак Ю. Л. Передумови формування здоров'язбережувального освітнього середовища закладу дошкільної освіти. *Наука, освіта та суспільство в XXI столітті: наукові ідеї та механізми реалізації* : збірник тез доповідей міжнародної науково-практичної конференції (Кропивницький, 19 листопада 2022 р.) : у 2 ч. Кропивницький : ЦФЕНД, 2022. Ч. 1. С. 34–36.

32. Чомко І. В., Калічак Ю. Л. Значення здоров'язбережувальних технологій в роботі з дошкільниками. *Дослідження різних напрямів розвитку психології та педагогіки* : збірник наукових робіт учасників міжнародної науково-практичної конференції (19–20 листопада 2021 р., м. Одеса). Одеса : ГО «Південна фундація педагогіки», 2021. С. 79–83.

33. Kalichak U. Yu., Kalichak Yu. L. Creation of health preserving environment in modern preschools. *Психологія та педагогіка: необхідність впливу науки на розвиток практики в Україні* : зб. тез наукових робіт учасників міжнар. науково-практичної конференції (м. Львів, 26–27 лютого 2021 р.). Львів : ГО «Львівська педагогічна спільнота», 2021. С. 109–117.

34. Kalichak Yu. Health-Protecting Psychologically Safe Developmental Environment of a Preschool Educational Institution. Human health: realities and prospects. Monographic series. Volume 4. Health and Biosensors. / Edited by N. Skotna, S. Voloshanska, T. Kavetskyy, O. Smutok, M. Gonchar. Drohobycz : Posvit, 2019. P. 230–237.

35. Kalichak Yu. L., Bondaruk R. I. Pedagogical conditions for creating a health-preserving environment in kindergarten. *Соціально-гуманітарний вісник* : зб. наукових праць. Вип. 62. Харків : СГ НТМ «Новий курс», 2025. С. 38–39.

36. Kalichak Yu. L., Demyanchuk M. M. The essence of preparation of preschool staff for health protection activities. *Сучасний вимір психології та педагогіки* : збірник тез наукових робіт учасників міжнародної науково-практичної конференції (м. Львів, 21–22 травня 2021 року). Львів : ГО «Львівська педагогічна спільнота», 2021. С. 65–72.

37. Калічак Ю. Л. Формування культури здоров'я дітей дошкільного віку: превентивний аспект. Public health system in Ukraine and EU countries: realities, transformation, development vectors, perspectives : scientific monograph. Riga, Latvia : Baltija Publishing, 2024. P. 561–585.

38. Kalichak Yu. L. Contents of Preschool Profile Specialist Training. Health Care Aspect. Annales Universitat is Mariae Curie-Skłodowska Lublin–Polonia. Sectio J. Vol. XXXVII, 2 2024. P. 73–88.

39. Калічак Ю. Л. Фізичне виховання дітей дошкільного віку засобами народних рухливих ігор. Modern science: prospects, innovations and technologies : Scientific monograph. Part 2. Riga, Latvia : Baltija Publishing, 2024. P. 250–274.

40. Kalichak Yu. L. Formation of social competence of senior preschool children by means of story-based role-playing games. Modernisation of Higher Education in Ukraine in the Context of Globalisation : Monograph / edited by A. M. Ivanovska. Kamianets-Podilskyi. Higher Educational Institution "Podillia State University". Riga, Latvia : "Baltija Publishing", 2025. P. 185–195.

Information about the author:
Kalichak Yurii,
Candidate of Pedagogical Sciences,
Associate Professor at the Department of General Pedagogy
and Preschool Education
Drohobych Ivan Franko State Pedagogical University
24, Ivan Franko Street, Drohobych, Ukraine

CHAPTER 42

ENVIRONMENTAL AND PROJECT-BASED ACTIVITIES IN THE SCHOOL GEOGRAPHY CURRICULUM: THEORETICAL AND METHODOLOGICAL FOUNDATIONS AND DIGITAL TOOLS FOR IMPLEMENTATION

Nepsha Oleksandr, Hryshko Svitlana, Levada Olga
DOI https://doi.org/10.30525/978-9934-26-714-7-42

INTRODUCTION

The study of geography provides broad opportunities for implementing the competence-based approach outlined in the State Standard for Basic Secondary Education and the Concept of the New Ukrainian School. Geography contributes to the development of environmental, civic, digital, and research competences while fostering critical thinking, spatial analysis, and the ability to interpret cartographic, statistical, and geospatial information. An essential component of geography education is engaging students in investigating environmental processes and addressing contemporary environmental challenges.

Environmental project-based learning is an effective approach that integrates research, practical, creative, and information-based activities. It enables students to apply theoretical knowledge to real environmental issues, develop teamwork, information-search, analytical, and presentation skills, and strengthen interdisciplinary connections with biology, chemistry, computer science, and civic education.

The rapid digitalization of education has considerably expanded the possibilities for organizing environmental projects. Digital tools such as Google Earth, Google Maps, geographic information systems (GIS), satellite imagery, and online platforms improve the visualization of geographical phenomena, facilitate data collection and analysis, and promote students' digital literacy and independent learning[1].

[1] Hryshko S. V., Levada O. M., Nepsha O. V., Koval D. O. Digital tools in teaching geography: the possibilities of Google Maps and Google Earth. *Cross-disciplinary studies in science, innovation and social development*. Vol. 3. Monograph. Prague : Publishing house Education and Science s.r.o., 2026. P. 382–392.

The integration of project-based learning with digital technologies creates favorable conditions for developing environmental competence, research skills, critical thinking, and spatial reasoning. By investigating authentic environmental problems and analyzing reliable geographical data, students acquire practical experience in decision-making and develop responsible attitudes toward environmental protection.

This study substantiates the theoretical and methodological foundations for organizing environmental project-based learning in the school geography curriculum using modern digital technologies. The proposed approach contributes to the development of environmental competence, digital literacy, civic responsibility, and students' readiness to support sustainable development through practical educational activities.

1. Theoretical and methodological foundations for organising environmental project work within the school geography curriculum

The current stage of civilisation's development is characterised by an intensification of contradictions within the "nature-society" system, which necessitates a re-evaluation of approaches to fostering environmental awareness and responsible behaviour in individuals. Under these circumstances, the comprehensive development of environmental education as an integrated pedagogical system aimed at harmonising human interaction with the environment takes on particular relevance. School education is a priority area in this process, as it is during this period that worldview orientations, value systems and behavioural models are established, which determine an individual's future outlook on life[2].

The school geography curriculum holds significant potential for achieving the goals of environmental education[3]. Its distinctive feature lies in the integrative nature of its content, which combines the study of natural processes, socio-economic phenomena and the spatial forms of social organisation. Such a comprehensive approach creates the methodological foundations for forming a holistic understanding of the patterns governing the functioning of the Earth's geographical envelope and the nature of the interactions between natural and anthropogenic components. Geography as a school subject provides an interdisciplinary synthesis of knowledge, promoting an understanding of global and regional environmental issues in their systemic context.

---

[2] Толочко С. В., Бордюг Н. С. Особливості інтеграції цифрового контенту в освітній процес із формування екологічного світогляду учнівської молоді. *Інноваційна педагогіка*. 2026. Вип. 95. Т. 2. С. 62–66.

[3] Мовчан В. В., Корнус О. Г., Корнус А. О. Екологічна освіта і виховання у шкільному курсі географії. *Наукові записки СумДПУ імені А. С. Макаренка. Географічні науки*. 2017. № 8. С. 191–195.

Environmental education within the study of geography involves a targeted pedagogical approach, the result of which is the development in pupils of an understanding of the unity and indivisibility of the planet's natural environment, an awareness of the need to optimise human society's interaction with the environment, as well as the acquisition of basic skills in geographical analysis and forecasting[4]. This involves not only the acquisition of factual knowledge, but also the development of spatial thinking, the ability to interpret environmental processes within the context of society's territorial organisation, and the ability to assess environmental risks and the consequences of economic activity. At the same time, an important outcome is the formation of a value-based attitude towards the environment in a broad worldview sense and a willingness to participate personally in nature conservation activities.

In scientific and pedagogical discourse, environmental education is viewed not merely as a process of imparting knowledge about the environment, but as a mechanism for fostering an active and positive attitude towards nature, grounded in environmental ethics and the principles of sustainable development]. Thus, its content goes beyond the purely informational and involves the development of creative and active attitudes towards the natural environment. Transforming environmental values into practical, scientifically grounded actions requires the development of responsibility, initiative, decision-making skills and the ability to anticipate the consequences of those decisions. Another important aspect is the development of a constructive, optimistic vision of the possibilities for solving environmental problems through active citizenship.

Project-based learning serves as an effective means of implementing these objectives in school practice; it is a specific form of pupils' educational and cognitive activity aimed at achieving a consciously defined, personally meaningful and socially motivated goal[5].

According to S. Tolochko and N. Bordyug, "the development of environmental competence in senior secondary school pupils through project-based and research activities promotes a deep understanding of environmental problems, the acquisition of practical experience, and their involvement in various projects"[6].

The application of the project-based approach involves engaging the intellectual, emotional, motivational-volitional, value-based, communicative

[4] Левада О. М., Гришко С. В., Непша О. В. Роль шкільного курсу географії у формуванні екологічної культури учнів. *Наука і техніка сьогодні*. 2025. № 3 (44). С. 566–582.

[5] Войтович О. П., Костолович М. І. Методика впровадження проєктів у шкільний курс географії. *Географічна освіта у шкільних та позашкільних закладах : проблеми, пошуки, перспективи* : збірник наукових праць. Рівне : Видавець О. Зень, 2020. С. 3–5.

[6] Толочко С. В., Бордюг Н. С. Екологічна компетентність учнів у контексті подолання екологічних наслідків війни : монографія. Київ : Компринт, 2024. 160 с.

and organisational components of the individual. Within the framework of such activities, exploratory, critical, predictive and axiological thinking are developed, as well as the ability to integrate knowledge across disciplines. Project tasks extend beyond the scope of individual academic disciplines, encompassing the natural sciences, humanities and technical fields in their interrelationship (Fig. 1). This facilitates an understanding of environmental issues as complex, cross-disciplinary and systemic, combining the natural and social aspects of development.

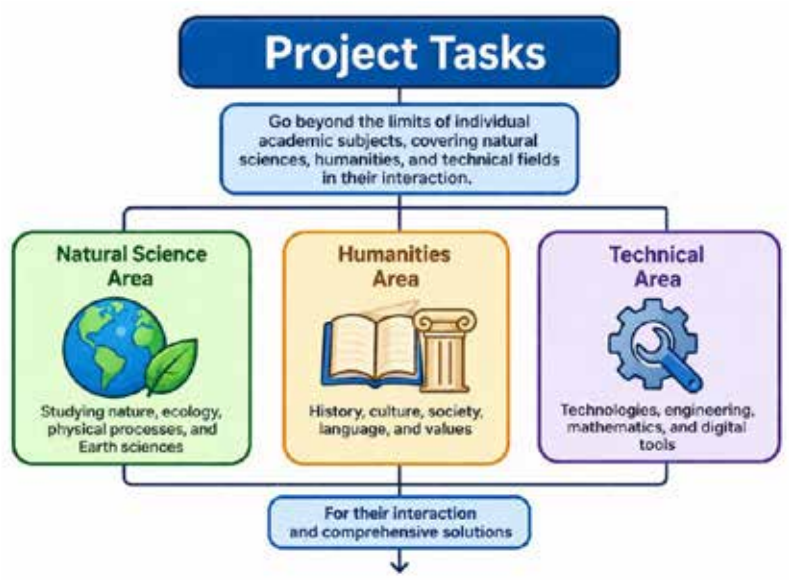


Fig. 1. The Interdisciplinary Nature of Project-Based Tasks

An important characteristic of the project-based approach is its situational nature. It encourages pupils to independently identify contradictions in real-life contexts, formulate problems and seek ways to solve them. Unlike abstract, model-based learning, project-based activities involve decision-making in specific, practically significant environmental situations, which enhances learners' awareness, sense of responsibility and social engagement[7].

[7] Титаренко В., Ковальчук В. Освітні технології розвитку екологічного мислення учнів у контексті сталого розвитку суспільства. *Науковий альманах мистецтва та освіти*. 2026. № 1. С. 65–67.

The aim of modelling educational environmental scenarios that replicate real-life circumstances is to create conditions for pupils to gain practical experience of action within a safe educational environment, one that allows for the possibility of making mistakes, recognising them and correcting them. This approach facilitates the development of behavioural strategies and value orientations without the risk of negative social or environmental consequences, which is of fundamental importance for the formation of an environmentally responsible individual.

The implementation of educational environmental scenarios contributes to the accumulation of multidimensional personal experience, in particular:

• experience of active agency, manifested in initiative, independence and the ability to apply general educational, communicative and socio-practical methods of action to solve specific real-life problems;

• experience of value-based self-determination, which encompasses the formation of one's own position, a reflective attitude towards alternative models of behaviour, and the making of moral choices;

• experience of motivational and volitional effort aimed at achieving a set goal whilst overcoming difficulties;

• experience of cooperation and tolerant interaction, which fosters the development of communicative skills and social responsibility;

• experience of organising activities – both individual and group-based – taking into account the principles of planning, the allocation of roles and the coordination of actions;

• experience of self-assessment and reflection on one's own behaviour (in particular, consumption patterns and lifestyle) in accordance with the legal and moral norms of society;

• experience in applying general scientific and communication skills within the framework of environmentally-oriented social practice, taking into account specific ethno-cultural conditions[8].

Real-life environmental situations that appeal to pupils' immediate needs and interests serve a motivational function, stimulating cognitive activity. The cognitive interest thus formed is transformed into an intrinsic motivation for practical environmental action within one's capabilities – from recognising the problem and setting goals to carrying out specific actions in the environment, with mandatory reflection on each stage of the activity.

[8] Djordjevic I., Jovanovic S., Markovic M., Andjelkovic S., Prnjat Z., Matović S., Valjarević A. Project-Based Learning in Geography and Its Impact on Developing Students' Values, Attitudes and Pro-Environmental Behavior. Sustainability. 2026. Vol. 18 (2). P. 725.

Educational environmental project work involves engaging pupils in a process of transformative activity, which should culminate in the practical implementation of the project[9]. In this context, one of the key criteria for assessing outcomes is the project's environmental and human health safety. This approach is consistent with the principles of sustainable development and encourages pupils to make responsible decisions.

The traditional focus of environmental project work is an environmental problem, which is interpreted as a conflict between society's growing needs and the limited resources and regenerative capacity of the natural environment. This contradiction is exacerbated by anthropogenic landscape transformation, urbanisation, and the reduced capacity of natural ecosystems to perform their environmental functions.

When implementing project-based activities within the school geography curriculum, it is advisable to organise the analysis of environmental issues along several methodological dimensions: by level of manifestation (global, regional, local); within the framework of a cultural-historical approach; drawing on pupils' personal experiences and their potential practical significance; and taking into account the positions of various stakeholders, which helps to develop the ability to step back from one's own point of view and analyse the problem from different perspectives[10].

The outcomes of environmental projects must be socially and practically significant. In the case of theoretical issues, this involves formulating a specific, scientifically sound conclusion or proposal for resolving the issue; in the case of practical projects, it involves creating a product ready for implementation.

Such outcomes may include, in particular, maps illustrating the environmental status of an area, illustrated collections of descriptions of natural features, photo albums, posters, presentations, thematic mini-guides or other informational and analytical materials of practical value to the local community (Table 1).

The use of digital technologies in environmental geography projects is an important factor in improving the quality of education, developing students' research skills, and fostering environmental awareness. Digital tools enable the integration of theoretical knowledge with practical activities, provide access to up-to-date information, and promote the development of critical thinking, analytical skills, and information literacy.

---

[9] Гришко С. В., Левада О. М., Прохорова Л. А., Непша О. В., Зав'ялова Т. В., Коваль Д. О. Еколого-проєктна діяльність як засіб формування екологічної компетентності учнів у процесі вивчення географії з використанням цифрових технологій. *Наука і техніка сьогодні.* 2026. № 4 (58). С. 1200–1214.

[10] Ковальова К. І., Нападовська Г. Ю. Метод проектів як засіб модернізації навчально-виховного процесу з географії. *Науковий вісник Херсонського державного університету. Серія: Географічні науки.* 2015. № 2. С. 113–118.

Table 1

Typology of environmental educational projects in the school geography curriculum

Parameter	Category	Characteristics	Examples for the School Geography Course
Number of Participants	Individual	The project is completed by one student, fostering independence and personal responsibility	Climate zone map, essay on environmental problems of the local region
	Group	The project is completed by a team of students, requiring cooperation and role distribution	Investigation of water pollution, integrated report on natural resources
Type of Student Activity	Group	The project is completed by a team of students, requiring cooperation and role distribution	Investigation of water pollution, integrated report on natural resources
	Creative	The project content depends on students' interests and creativity	Illustrated glossary of geographical terms, presentation “Landscapes of Ukraine”
	Role-playing (Simulation)	Students perform different tasks within the same topic and combine their results into a common product	Booklet «Climate Zones of the World», conference lesson “Urban Ecology”
	Research	Includes all stages of scientific research	Report “The Impact of Urbanization on Natural Complexes”, poster “National Parks of Ukraine”
	Informational	Collection, analysis, and systematization of information without conducting experiments	Booklet “Natural Resources of the Region”, presentation on climate anomalies
	Practice-oriented	Has a clear structure and assigned roles; produces socially or practically valuable outcomes	Wall newspaper, posters, exhibition of environmental projects
Duration	Mini-project	Completed within a single lesson	Short map of forest distribution, mini-report on rivers of the region
	Short-term	Completed outside class within the study of a particular topic	Booklet on the natural resources of the district or region
	Long-term	Conducted over a school year or longer	Water quality monitoring, climate change research project
Coordination	Hidden Coordination	The teacher actively participates in the implementation of the project	Collecting data for the poster “Protected Areas of Ukraine”
	Open Coordination	The teacher coordinates, supervises, and provides guidance while students work independently	Students independently conduct research and receive teacher consultations when necessary
Project Function	Educational	Aimed at developing students' competencies over an extended period	Report on climate zones, weather observation diary
	Assessment	Intended to evaluate students' knowledge, skills, and learning outcomes	Assessment of project presentations, posters, exhibitions, and project reports

The organization of environmental projects should be based on a comprehensive approach that integrates natural, socio-economic, and spatial dimensions of research. Digital technologies significantly expand the possibilities for such analyses. For example, students can create interactive maps using Google Earth to monitor changes in forested areas or water pollution within their region, combining geographical information with environmental indicators[11].

The practical orientation of environmental projects is achieved through the application of knowledge to real-life situations. Digital technologies make these activities more accurate, interactive, and visually engaging. For instance, students can use mobile applications to record environmental observations, document cases of river pollution, analyze traffic intensity, or measure air quality indicators.

A value-oriented approach aims to develop responsible attitudes toward nature and readiness to participate in environmental protection activities. Digital environments create opportunities for students' civic engagement by enabling them to develop online petitions or conduct awareness campaigns through social media to promote the conservation of local natural resources. Such activities effectively combine educational objectives with social practice.

Another important feature is the situational nature of environmental projects, in which learning tasks simulate real-world interactions between humans and the environment. Using specialized simulation platforms such as EcoChains or SimCity Education, students can model the consequences of deforestation, urbanization, or climate change, analyze potential environmental risks, and predict the outcomes of various management decisions.

The implementation of environmental projects involves several successive stages. During the stage of problem identification and goal setting, it is advisable to use open-access data provided by local authorities or environmental agencies. For example, students may identify environmental «hotspots» within their community and integrate these data into ArcGIS Online, thereby defining a clear research objective.

During the planning and simulation stage, it is essential to create a safe learning environment that encourages experimentation and accepts mistakes as part of the learning process. Online environmental simulators allow students to model the effects of water or soil pollution without causing actual environmental damage, thereby promoting analytical thinking and problem-solving skills.

[11] Гришко С. В., Непша О. В. Теоретико-методичні засади використання інформаційних технологій в освітньому процесі та їх практичне застосування на уроках географії. *Актуальні питання у сучасній науці*. 2025. № 4 (34). С. 1015–1028.

The implementation and analysis stage actively engages students in data collection and processing. The use of sensors and digital measuring devices to assess air quality, water temperature, or noise levels, followed by data processing in Google Sheets or Microsoft Excel, develops students' competencies in data management, graphical representation, and statistical analysis.

The final stage involves reflection and presentation of research findings. Students may present their results through interactive presentations created in Canva, Genially, or Microsoft Power BI, as well as digital maps, photo albums, or educational booklets. Such formats contribute to the development of communication skills and the ability to effectively present research outcomes.

Environmental projects may differ in terms of their typology and implementation formats. They can be individual or group-based; creative, role-playing, research, informational, or practice-oriented; short-term or long-term; and implemented with either open or hidden teacher coordination. For example, a month-long group research project may involve collecting air quality data using mobile sensors and developing an analytical dashboard in Google Data Studio to visualize and interpret the results.

From a methodological perspective, it is advisable to employ authentic, real-life situations that correspond to students' interests and experiences. For instance, observing local flora and fauna through applications such as iNaturalist or eBird enables students to combine field investigations with the digital documentation of research findings. It is equally important to encourage students' independence and initiative, organize collaborative teamwork with clearly assigned roles, incorporate reflective activities, and ensure the technological safety of all learning processes.

The integration of interactive and multimedia resources, including interactive maps, video reports, virtual field trips, and virtual reality (VR) environments, enhances the visualization of geographical phenomena and increases students' motivation to learn. Furthermore, the implementation of an interdisciplinary approach enables geography to be effectively integrated with mathematics and computer science through the analysis of environmental statistics, the construction of charts and graphs, and the development of infographics.

Thus, school geography serves as an effective platform for implementing environmental project-based learning, providing students with opportunities to participate directly in practical and research-oriented activities related to the study of the natural environment and its interaction with society. The application of such approaches contributes not only to the acquisition of environmental knowledge but also to the development of students' value-based attitudes toward environmental protection, ecological awareness, and responsible behavior in everyday life. Environmental project-based learning enables students to acquire

practical experience in planning, analysis, collaboration, and decision-making, thereby enhancing their ability to evaluate the consequences of human activities for the environment and to participate actively in its conservation[12].

The integration of digital technologies into environmental geography projects not only improves the effectiveness of the educational process but also contributes to the development of environmental culture, digital literacy, and active citizenship among students.

Therefore, the integration of environmental project-based methods into geography education constitutes an essential component of contemporary environmental education aimed at fostering environmentally responsible, active, and conscious attitudes toward the natural environment among younger generations. This approach equips students with the competencies required to address current environmental challenges while promoting sustainable development principles and lifelong environmental responsibility.

2. Methodological Support for Environmental Project-Based Learning in the School Geography Curriculum Using Digital Technologies

Methodological Principles for Organizing Students' Environmental Project-Based Learning in Geography Education

1. General General Principles for Organizing Environmental Projects:

1. Comprehensive approach – integrate natural science, socio-economic, and spatial aspects when studying environmental issues. For example: creating interactive maps in Google Earth to monitor changes in forest areas or water pollution in your region.

2. Practical orientation – provide students with opportunities to apply their knowledge in real environmental situations. For example: using mobile applications to record environmental observations, such as documenting river pollution, monitoring traffic intensity, or measuring air quality.

3. Value-oriented approach – foster students' responsible attitudes toward nature and their readiness to participate actively in environmental protection activities. For example: creating online petitions or interactive social media campaigns aimed at conserving local natural resources.

4. Situational nature of the project – use tasks that reproduce real-life situations and problems related to the interaction between humans and the environment. For example: modeling the consequences of deforestation or

[12] Hryshko S. V., Levada O. M., Nepsha O. V., Koval D. O. Theoretical and methodological foundations for organising students' environmental project activities in school geography courses using distance learning and learning management systems. *Cross-disciplinary studies in science, innovation and social development.* Vol. 7. Monograph. Prague : Publishing house Education and Science s.r.o., 2026. P. 85–95.

climate change using specialized simulators (e.g., EcoChains or SimCity Education).

2. Stages of Organizing Environmental Educational Projects:

1. Problem identification and project goal setting – select local, regional, or global environmental problems; formulate clear objectives that correspond to educational and practical goals. For example: identifying environmental "hotspots" in your city using open data provided by local authorities and integrating them into a map in ArcGIS Online.

2. Planning and situation modeling – create a safe educational environment for practical activities; allow opportunities for making mistakes and correcting actions. For example: using online environmental process simulators to model the consequences of human activities (e.g., water or soil pollution).

3. Implementation and analysis – engage students in problem-solving, observations, research, and environmental risk assessment. For example: using sensors and digital measuring devices to monitor air quality, water temperature, or noise levels, followed by data analysis in Google Sheets or Microsoft Excel.

4. Reflection and presentation of results – organize discussions, analyze completed work, and present the results in the form of thematic maps, photo albums, educational booklets, or interactive materials. For example: creating interactive presentations in Canva, Genially, or Microsoft Power BI to visualize the results of environmental research.

3. Typology and Forms of Projects:

– by the number of participants: individual, group;

– by the type of activity: creative, role-playing, research, informational, practice-oriented;

– by duration: mini-projects (within one lesson), short-term (extracurricular), long-term (throughout the academic year);

– by coordination: with open or hidden teacher participation;

– by methods of data collection: verbal, observational, statistical, experimental;

– by function: educational and assessment-oriented.

For example: a month-long group research project in which students collect air quality data using mobile sensors and create a dashboard in Google Data Studio.

4. Methodological Recommendations:

1. Use authentic, real-life situations that appeal to students' interests in order to foster intrinsic motivation for environmental activities. For example: observing flora and fauna using the iNaturalist or eBird applications.

2. Encourage students' independence and initiative by promoting inquiry-based and critical thinking.

3. Organize collaboration and teamwork by assigning specific roles and responsibilities within group projects.

4. Include a reflective component in which students evaluate their own actions and their impact on the environment.

5. Ensure the technological safety of projects for students' health and the surrounding environment.

6. Incorporate a variety of interactive and multimedia resources (maps, videos, presentations) to improve visualization and increase student engagement. For example: interactive maps, video reports, virtual field trips, or virtual reality (VR) environments for studying ecosystems.

7. Integrate an interdisciplinary approach by combining knowledge from natural sciences, humanities, and technical disciplines. Combine geography with mathematics and computer science when analyzing environmental pollution statistics and creating infographics.

Practicum of Environmental Educational Projects Using Digital Technologies

Project 1. "Interesting Facts about the Oceans and Their Protection".

Project Objectives:

– to familiarize students with the main characteristics and interesting facts about the oceans;

– to enhance students' environmental awareness by demonstrating the impact of human activities on ocean ecosystems;

– to develop students' skills in information search, critical analysis, and selection of key data;

– to foster teamwork, presentation skills, and a creative approach to learning.

Stages of the Project:

1. Topic Selection and Group Formation.

Students, together with the teacher, selected the project topic «Interesting Facts about the Oceans and Their Protection».

Groups:

Group I – Young Explorers of the Pacific Ocean

Group II – Atlantic Ocean Research Group

Group III – Indian Ocean Scientists

Group IV – Arctic Ocean Explorers

Information Search and Collection: Students use Internet resources, electronic encyclopedias, and scientific articles to collect interesting and important information about the selected ocean.

2. Additional Activities.

Collecting information on environmental problems affecting the oceans, such as plastic pollution, climate change, coral reef degradation, and species extinction.

Analyzing and processing the collected data by identifying the main facts and unique characteristics of each ocean.

Identifying environmental threats and their consequences for marine flora and fauna.

Discussing possible actions to preserve ecological balance, such as reducing plastic consumption and supporting marine wildlife conservation programs.

3. Creation of Visual Materials.

Designing a poster using Canva, Microsoft PowerPoint, or hand-drawn illustrations.

Organizing the information into the following sections: “Interesting Facts”, “Environmental Problems” and “How We Can Help” (Fig. 2).

Using color schemes, ocean images, ecosystem diagrams, and infographics illustrating environmental threats.

4. Presentation of Results.

Presenting posters either in the classroom or via the Zoom platform.

Each group presents its work, explains the selected information, discusses environmental conclusions, and proposes possible solutions.

Conducting a discussion of the presentations, providing comments, and carrying out peer assessment.

Project Outcomes:

– students reinforced their knowledge of the geographical and natural characteristics of the oceans;

– students recognized the importance of ocean conservation and understood the impact of human activities on marine ecosystems;

– students developed skills in searching for, analyzing, and organizing information;

– students learned to work collaboratively, plan group activities, and present project results;

– students’ motivation for independent learning and creative engagement with educational content increased.

Reflection:

– students discuss what new knowledge they have gained about the oceans and their environmental problems;

– students analyze their own contribution to group work, evaluate how effectively they collaborated, identified key information, and distributed responsibilities;

– students reflect on the actions they can personally take to contribute to ocean conservation in their everyday lives;

– students express their opinions on how digital technologies facilitate environmental research and promote public awareness of ecological issues.



Fig. 2. Example of a Poster as a Guideline for Students

Project 2. "Environmentally Safe Production".

Aims of the project:

– to familiarise pupils with the characteristics of production processes and their impact on the environment;

– to develop skills in analysing pollution chains and identifying alternative, environmentally safe solutions for businesses;

– to foster an understanding of the importance of environmental safety and a responsible approach to manufacturing activities.

Stages of the project:

1. Identifying the problem: discussing environmental issues arising from manufacturing processes; pupils select a specific enterprise or type of manufacturing activity to investigate.

2. Research and data collection: studying the enterprise's technological processes and analysing sources of pollution; collecting data through observation, interviews with staff, official sources and statistics.

3. Analysis and discussion: identifying key stages of the production process that require improvement; discussing possible environmentally safe alternative solutions and technologies.

4. Developing solutions: formulating proposals to reduce the negative impact on the environment; identifying practical measures: using safe materials, optimising waste management, and recycling or reprocessing waste.

5. Practical implementation and modelling: pupils create information material, a poster or a presentation illustrating the proposed measures; possible modelling of changes to the production process to demonstrate the results.

6. Presentation of results: preparing a report, presentation or booklet using Canva or PowerPoint to present to the class or the school community; discussing the effectiveness of the proposed solutions and practical measures.

Summary and assessment:

– pupils receive feedback from the teacher on the quality of their analysis and the creativity of the proposed solutions;

– emphasis is placed on understanding the pollution cycle and the need for environmental safety in manufacturing;

– knowledge, analytical skills, the ability to propose practical solutions and the ability to present results are assessed.

Reflection: pupils discuss what went well, what difficulties arose and how environmental approaches in manufacturing can be improved.

Project 3. "Peaceful Coexistence on the Planet".

Aims of the project:

– to foster an awareness among schoolchildren of the global interdependence of people and natural systems;

– to develop skills for assessing the impact of various social and economic factors on the environment;

– to raise environmental awareness and encourage peaceful and sustainable practices in everyday life.

Stages of the project:

1. Introduction to the concept of peaceful coexistence between people and nature.

2. Exploring global environmental issues through examples of international initiatives.

3. Identifying practical local solutions to reduce humanity's negative impact on the environment.

4. Developing their own proposals for improving the state of the environment.

5. Presenting the results in the form of posters, short presentations or interactive presentations using Canva or PowerPoint.

Outcomes:

– pupils demonstrate an understanding of global environmental processes and their own role in managing them;

– skills in analysing, finding solutions and presenting environmental initiatives are developed.

Reflection: pupils discuss what new insights they have gained into the interdependence of people and nature, what practical actions they can take in their own lives to improve the state of the environment, and assess their own contribution to the group work.

Project 4. "National Health and Social Development".

Project objectives:

– to demonstrate the interconnection between the environment, public health and social development;

– to foster the development of skills in researching and analysing environmental and social indicators;

– to instil in school pupils an active civic stance in support of an environmentally sustainable lifestyle.

Stages of work:

1. Analysis of public health issues and the impact of the environment on public health.

2. Gathering information on the state of the environment and social indicators in the region.

3. Discussion of possible ways to improve public health and the environmental situation.

4. Development of practical recommendations for the local community.

5. Presentation of findings via posters, leaflets or online presentations using Canva or PowerPoint.

Outcomes:

– pupils recognise the interconnection between the state of the environment and human health;

– analytical skills are developed, along with the ability to propose practical solutions to improve the environment and social development.

Reflection: pupils assess which environmental factors have the greatest impact on human health, how their analysis has helped identify ways to improve the local environmental situation, and discuss what actions they are prepared to take in their daily lives.

Project 5. "Appeal to the United Nations".

Project Objectives:

– to familiarize students with international environmental initiatives and the role of the United Nations in their implementation;

– to develop students' skills in preparing appeals, reports, and proposals addressing environmental issues;

– to foster critical and systems thinking in the context of global environmental challenges.

Project Stages:

1. Study the structure and functions of the United Nations in the field of environmental protection.
2. Analyze global environmental issues that require international attention.
3. Develop an appeal or formulate proposals for addressing a specific environmental problem.
4. Prepare a written document, presentation, or multimedia project using Canva or Microsoft PowerPoint.
5. Present the project outcomes to the class, the school community, or in an online format.

Project Outcomes:

– students gain practical experience in participating in international initiatives;

– students develop skills in systems analysis, evidence-based presentation, and a responsible approach to addressing global environmental challenges.

Reflection: Students reflect on the extent to which global environmental issues affect local communities, consider what actions they can take to support international environmental initiatives, and evaluate the new knowledge and skills they have acquired throughout the project.

Project 6. "The Rate and Consequences of Large-Scale Anthropogenic Transformation of the Coastal Landscape of the United Arab Emirates (A Case Study of Dubai)".

Project Task: Using Google Maps, Google Earth, and satellite imagery (Fig. 3), investigate how Dubai has created a new geography of its coastline and analyze the causes and consequences of this transformation.

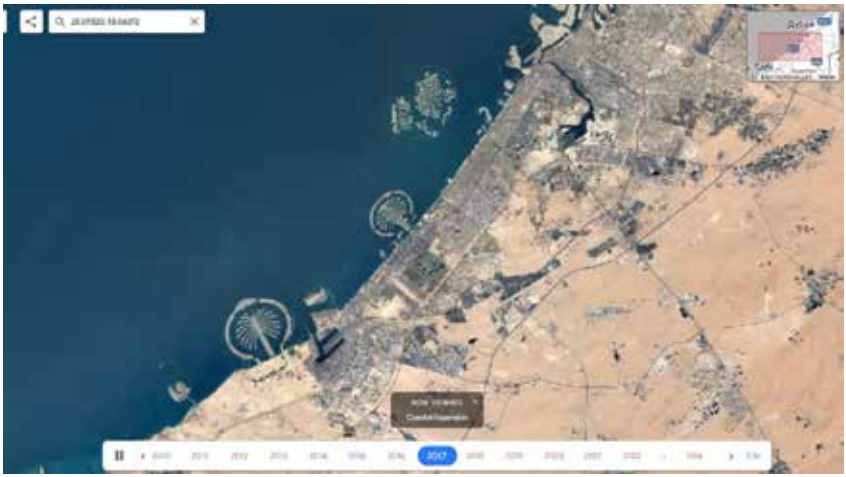


Fig. 3. Visualization of the Study Area – Dubai, United Arab Emirates[13]

Project Stages:

Stage 1. Visualization and Quantitative Assessment

1. Locate the coastline of Dubai in Google Maps (approximate coordinates: 25.09319, 55.06372). Identify and name the major artificial archipelagos visible in the satellite image (e.g., Palm Jumeirah and The World Islands).

2. Use the "Measure Distance" tool in Google Maps or Google Earth to:

– estimate the length of the artificially constructed trunk of Palm Jumeirah;

– determine how far the outermost islands of The World archipelago are located from the original coastline.

3. Using Google Earth Timelapse, compare satellite images of Dubai from 2001 and the current year. Determine how long it took to construct Palm Jumeirah.

Stage 2. Socio-Economic Aspect of the Study.

1. Investigate why the United Arab Emirates invested billions of dollars in land reclamation instead of expanding the city further into the desert. What objectives were achieved through this project (e.g., tourism development, real estate expansion, or the establishment of a global financial hub)?

2. Analyze how the construction of these artificial islands affected one of the most important geographical indicators – the length of the UAE coastline. To what extent did the artificial islands increase the country's total coastline?

[13] Watch Dubai evolve from desert to cosmopolitan in 32 years. URL: https://www.khaleejtimes.com/uae/watch-dubai-evolve-from-desert-to-cosmopolitan-in-32-years?utm_source=chatgpt.com.

3. Determine which natural resources were used to construct these islands (e.g., the type of material and the origin of the sand) and identify the methods used to transport these materials.

Stage 3. Environmental Aspect of the Study.

1. Investigate how sand reclamation and the alteration of the coastline have affected the ecology of the Arabian Gulf. Which environmental components have been most significantly influenced by changes in marine currents (e.g., coral reef degradation or water stagnation)?

2. Considering that the artificial islands are low-lying coastal structures, formulate a hypothesis explaining how a global sea-level rise of even 1–2 meters could threaten these large-scale investment projects in the future.

3. Find information on how Palm Jumeirah is protected against coastal erosion and severe storms (e.g., through the construction of breakwaters).

Research Outcome: Prepare an analytical map or a concise report containing screenshots from Google Maps and conclusions explaining how Dubai's economic ambitions have transformed its geography while creating new environmental and engineering challenges.

Project Outcomes:

– students gained practical experience in using digital mapping services (Google Maps and Google Earth) to investigate anthropogenic changes in coastal landscapes;

– students understood how large-scale engineering and economic projects can transform urban geography by creating artificial archipelagos and extending the coastline;

– students analyzed the socio-economic motivations behind the construction of artificial islands, including the development of tourism, real estate, and the financial sector;

– students evaluated the environmental consequences of coastal transformation, particularly its effects on marine currents, coral reefs, and the risks associated with global sea-level rise;

– students developed the ability to formulate analytical conclusions and prepare visual reports using maps, satellite imagery, and screenshots.

Reflection:

– students discuss what surprised them most about the pace of anthropogenic transformation of the coastal landscape and the scale of these changes;

– students evaluate how economic ambitions influence the natural environment and explain why environmental risks should be considered when planning large-scale development projects;

– students reflect on which lessons from this case study can be applied to local environmental issues and identify preventive measures that could reduce the negative impacts of similar engineering interventions;

– students analyze their own actions by considering how they can contribute to sustainable development and environmental protection in their daily lives and educational environment.

CONCLUSIONS

As a result of the theoretical analysis of the problem of organizing environmental project-based learning in the school geography curriculum, it was established that school geography possesses considerable integrative potential for implementing the objectives of environmental education, as it combines natural, socio-economic, and spatial dimensions of environmental studies. Geography provides a systematic understanding of the relationships within the «nature–society» system, promotes the development of spatial thinking, and fosters students' ability to analyze environmental processes, assess environmental risks, and predict the consequences of human economic activities.

It has been substantiated that project-based learning is an effective pedagogical tool for developing students' environmental competence. Its main advantage lies in integrating the cognitive, value-based, motivational, and practical components of the educational process. The project-based approach ensures the integrity of learning, from problem identification to the analysis of results and reflection, while encouraging students to solve authentic environmental problems.

It has been established that the situational nature of environmental project-based learning creates favorable conditions for students to acquire practical experience in decision-making within a safe educational environment. Modeling real-life environmental situations contributes to the development of students' agency, value-based self-determination, motivational and volitional qualities, communication skills, and self-assessment abilities.

It has been determined that environmental issues constitute the central conceptual core of environmental project-based learning. Their analysis should take into account different levels of manifestation (global, regional, and local), the cultural and historical context, the perspectives of various stakeholders, and students' personal experiences. Such an approach promotes the development of systems thinking, critical thinking, and multi-perspective analysis.

The typology of environmental educational projects has been generalized according to the number of participants, the type of activity, project duration, the nature of teacher coordination, and their functional purpose. This classification makes it possible to adapt instructional formats to educational objectives, students' age characteristics, and the content of the geography curriculum.

Particular emphasis has been placed on the role of digital technologies as an important factor in the modernization of environmental project-based learning. Their application expands opportunities for data collection, analysis, and visualization, enhances the clarity and accessibility of research findings, and contributes to the development of digital literacy and interdisciplinary integration. The use of digital tools effectively combines theoretical instruction with practical activities, thereby meeting the requirements of contemporary education and the principles of sustainable development.

Thus, the theoretical and methodological foundations for organizing environmental project-based learning in the school geography curriculum are based on the principles of interdisciplinarity, competency-based education, situational learning, and the practical relevance of the educational process.

SUMMARY

This chapter examines the theoretical and methodological foundations of organizing environmental project-based learning in the school geography curriculum under the conditions of educational digitalization. The role of project-based learning as an effective means of developing students' environmental competence, research skills, and digital literacy is substantiated. The principles, stages of implementation, typology, and methodological features of environmental educational projects using modern digital technologies are identified. A set of practical environmental project tasks based on the use of Google Earth, Google Maps, ArcGIS Online, Canva, and other digital tools is proposed to support the study of natural and socio-economic processes. The findings demonstrate that the integration of digital resources enhances the visualization of learning, promotes critical thinking, spatial analysis, geospatial data processing skills, and interdisciplinary integration. It is established that environmental project-based learning facilitates the practical application of geographical knowledge, fosters environmental awareness, encourages responsible attitudes toward the environment, and prepares students to address contemporary environmental challenges. The results of the study can be applied by geography teachers and general secondary education institutions to improve geography teaching methodologies through the effective use of digital technologies.

Bibliography

1. Hryshko S. V., Levada O. M., Nepsha O. V., Koval D. O. Digital tools in teaching geography: the possibilities of Google Maps and Google Earth. *Cross-disciplinary studies in science, innovation and social development*. Vol. 3. Monograph. Prague: Publishing house Education and Science s.r.o., 2026. P. 382–392. https://doi.org/10.65237/3-2026-25.

2. Толочко С. В., Бордюг Н. С. Особливості інтеграції цифрового контенту в освітній процес із формування екологічного світогляду учнівської молоді. *Інноваційна педагогіка*. 2026. Вип. 95. Т. 2. С. 62–66. https://doi.org/10.32782/ip/93.2.11.

3. Мовчан В. В., Корнус О. Г., Корнус А. О. Екологічна освіта і виховання у шкільному курсі географії. *Наукові записки СумДПУ імені А. С. Макаренка. Географічні науки*. 2017. № 8. С. 191–195.

4. Левада О. М., Гришко С. В., Непша О. В. Роль шкільного курсу географії у формуванні екологічної культури учнів. *Наука і техніка сьогодні*. *Серія «Педагогіка», Серія «Право», Серія «Економіка», Серія «Фізико-математичні науки», Серія «Техніка»*: журнал. 2025. № 3 (44). С. 566–582. https://doi.org/10.52058/2786-6025-2025-3(44)-566-582.

5. Войтович О. П., Костолович М. І. Методика впровадження проєктів у шкільний курс географії. *Географічна освіта у шкільних та позашкільних закладах: проблеми, пошуки, перспективи* : збірник наукових праць. Рівне : Видавець О. Зень, 2020. С. 3–5.

6. Толочко С. В., Бордюг Н. С. Екологічна компетентність учнів у контексті подолання екологічних наслідків війни : монографія. Київ : Компринт, 2024. 160 с.

7. Титаренко В., Ковальчук В. Освітні технології розвитку екологічного мислення учнів у контексті сталого розвитку суспільства. *Науковий альманах мистецтва та освіти*. 2026. № 1. С. 65–67. https://doi.org/10.31652/3041-1017-SAAE-2025.1.19.

8. Djordjevic I., Jovanovic S., Markovic M., Andjelkovic S., Prnjat Z., Matović S., Valjarević A. Project-Based Learning in Geography and Its Impact on Developing Students' Values, Attitudes and Pro-Environmental Behavior. *Sustainability*. 2026. Vol. 18 (2). P. 725. https://doi.org/10.3390/su18020725.

9. Гришко С. В., Левада О. М., Прохорова Л. А., Непша О. В., Зав'ялова Т. В., Коваль Д. О. Еколого-проєктна діяльність як засіб формування екологічної компетентності учнів у процесі вивчення географії з використанням цифрових технологій. *Наука і техніка сьогодні. Серія «Педагогіка», Серія «Право», Серія «Економіка», Серія «Фізико-математичні науки», Серія «Техніка»:* журнал. 2026. № 4 (58). С. 1200–1214. https://doi.org/10.52058/2786-6025-2026-4(58)-1200-1214.

10. Ковальова К. І., Нападовська Г. Ю. Метод проектів як засіб модернізації навчально-виховного процесу з географії. *Науковий вісник Херсонського державного університету. Серія : Географічні науки.* 2015. № 2. С. 113–118.

11. Гришко С. В., Непша О. В. Теоретико-методичні засади використання інформаційних технологій в освітньому процесі та

їх практичне застосування на уроках географії. *Актуальні питання у сучасній науці. Серія «Педагогіка», Серія «Право», Серія Економіка», Серія «Державне управління», Серія «Техніка», Серія «Історія та археологія»»: журна*л. 2025. № 4 (34). С. 1015–1028. https://doi.org/10.52058/2786-6300-2025-4(34)-1015-1028.

12. Hryshko S. V., Levada O. M., Nepsha O. V., Koval D. O. Theoretical and methodological foundations for organising students' environmental project activities in school geography courses using distance learning and learning management systems. *Cross-disciplinary studies in science, innovation and social development.* Vol. 7. Monograph. Prague : Publishing house Education and Science s.r.o., 2026. P. 85–95. https://doi.org/10.65237/7-2026-3.

13. Watch Dubai evolve from desert to cosmopolitan in 32 years. URL: https://www.khaleejtimes.com/uae/watch-dubai-evolve-from-desert-to-cosmopolitan-in-32-years?utm_source=chatgpt.com (дата звернення: 11.07.2026).

Information about the authors:

Nepsha Oleksandr,
Senior Lecturer at the Department of Geography and Tourism
Bogdan Khmelnitsky Melitopol State Pedagogical University
59, Naukovoho mistechka Street, Zaporizhia, Ukraine

Hryshko Svitlana,
Candidate of Geographical Sciences, Associate Professor,
Head of the Department of Geography and Tourism
Bogdan Khmelnitsky Melitopol State Pedagogical University
59, Naukovoho mistechka Street, Zaporizhia, Ukraine

Levada Olga,
Candidate of Geographical Sciences,
Associate Professor at the Department of Geography and Tourism
Bogdan Khmelnitsky Melitopol State Pedagogical University
59, Naukovoho mistechka Street, Zaporizhia, Ukraine

CHAPTER 43

ҐРУНТОВО-ЕКОЛОГІЧНІ ДОСЛІДЖЕННЯ В СИСТЕМІ ПІДГОТОВКИ ФАХІВЦІВ ГЕОГРАФІЧНОГО ПРОФІЛЮ ЯК ОСНОВА СТАЛОГО РОЗВИТКУ ТЕРИТОРІЙ (НА ПРИКЛАДІ ЗАКАРПАТСЬКОЇ НИЗОВИНИ)

Салюк Мар'яна, Микита Михайло
DOI https://doi.org/10.30525/978-9934-26-714-7-43

ВСТУП

Сучасний етап цивілізаційного розвитку характеризується глобальним усвідомленням того, що економічне зростання не може бути відокремленим від екологічної безпеки та раціонального використання природних ресурсів. Концепція сталого розвитку для аграрних територій набула статусу важливого орієнтиру, спрямованого на збалансування економічних, соціальних та екологічних інтересів. В умовах сучасних викликів пріоритетом екологічної політики ЄС та України є збереження родючості й екологічних функцій ґрунтів як базису продовольчої безпеки та кліматичної стійкості[1]. В Україні цей вектор закріплено на нормативному рівні в Указі Президента «Про Цілі сталого розвитку України на період до 2030 року»[2], а також у Державній стратегії регіонального розвитку на 2021–2027 роки[3], що визначають пріоритети раціонального природокористування й оптимізації землекористування. Реалізація цих завдань потребує модернізації земельних відносин та впровадження екологічно орієнтованих моделей розвитку, що підтверджується сучасними науковими дослідженнями[4].

[1] Генеральний директорат з питань навколишнього середовища Європейської комісії. Стратегія ЄС щодо ґрунтів на період до 2030 року – На шляху до здорових ґрунтів для людей і планети. Брюссель : Бюро публікацій Європейського Союзу, 2021. URL: https://data.europa.eu/doi/10.2779/629859.

[2] Про Цілі сталого розвитку України на період до 2030 року : Указ Президента України від 30.09.2019 № 722/2019. URL: https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/722/2019#Text.

[3] Про затвердження Державної стратегії регіонального розвитку на 2021–2027 роки : постанова Кабінету Міністрів України від 5 серпня 2020 р. № 695. URL: https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/695-2020-%D0%BF#Text.

[4] Попович К. Г. Відкриття ринку землі та модернізація аграрного законодавства України: правові аспекти 2025 року. *Науковий вісник Ужгородського національного університету. Серія: Право*. 2025. Вип. 4, ч. 2. С. 81–85. https://doi.org/10.24144/2788-6018.2025.04.2.12.

Особливого значення в цьому контексті набуває ґрунтово-екологічний моніторинг, який передбачає не лише систематичне спостереження за станом ґрунтового покриву, а й комплексне оцінювання природних і антропогенних процесів, прогнозування змін та інформаційне забезпечення управлінських рішень. Важливим етапом у створенні єдиної європейської системи оцінювання стану земель стало ухвалення Директиви (ЄС) 2025/2360 щодо моніторингу та стійкості ґрунтів (Soil Monitoring Law)[5]. Крім того, використання геоінформаційних систем та цифрового картографування розширює можливості дослідження ґрунтів і сприяє інтеграції вітчизняних досліджень до загальноєвропейських мереж моніторингу. Отже, ґрунти розглядаються не лише як засіб сільськогосподарського виробництва, а як стратегічний природний капітал, від стану якого залежать екологічна безпека та добробут суспільства[6].

Особливої актуальності зазначені питання набувають для Закарпатської низовини – регіону, який вирізняється найвищим потенціалом для інтенсивного землеробства в області та водночас підвищеною вразливістю до деградаційних процесів. Збереження родючості ґрунтів тут ускладнюється поєднанням демографічних, географічних, гідрологічних і антропогенних факторів, зокрема високою щільністю населення, транскордонним розташуванням та конкуренцією за землекористування. Як свідчать результати моніторингу, для території характерна значна просторова диференціація показників родючості та поширення негативних процесів (дегуміфікації, ерозії, оглеєння, забруднення), що зумовлює потребу в диференційованих підходах до їх використання, охорони та вивчення[7]. На міжнародному рівні такі підходи узагальнено в Добровільних настановах зі сталого управління ґрунтами[8].

Важливою складовою реалізації принципів сталого розвитку є підготовка фахівців, здатних здійснювати комплексні природничі дослідження та впроваджувати сучасні методи управління земельними ресурсами. Сучасна вища освіта орієнтується на компетентнісний і практико-орієнтований підходи, інтегруючи фундаментальні знання з польовими дослідженнями, лабораторними роботами та

---

[5] Директива (ЄС) 2025/2360 Європейського Парламенту та Ради від 12 листопада 2025 року про моніторинг ґрунтів та стійкість (Закон про моніторинг ґрунтів). *Офіційний вісник Європейського союзу*. 2025. L 2025/2360. ELI: http://data.europa.eu/eli/dir/2025/2360/oj.

[6] Позняк С. П., Гавриш Н. С. Роль ґрунтів у розвитку суспільства. *Український географічний журнал*. 2019. № 2. С. 57–61. https://doi.org/10.15407/ugz2019.02.057.

[7] Еколого-агрохімічна оцінка ґрунтів Закарпаття / Ю. Ю. Бандурович та ін. *Родючість і охорона ґрунтів.* 2017. № 4. С. 46–52. https://doi.org/10.33730/2077-4893.4.2017.219728.

[8] Baritz R., Wiese L., Verbeke I., Vargas R. Voluntary Guidelines for Sustainable Soil Management: Global Action for Healthy Soils. *International Yearbook of Soil Law and Policy*. 2017. P. 17–36.

геоінформаційними технологіями. Заклади вищої освіти мають виступати не лише трансляторами знань, а й осередками їх створення, поєднуючи освітню та науково-дослідну діяльність[9]. Залучення здобувачів до польових експедицій, ґрунтових обстежень та моніторингових досліджень сприяє формуванню професійних компетентностей і здатності приймати науково обґрунтовані рішення щодо раціонального природокористування.

Метою роботи є комплексне обґрунтування ролі ґрунтового покриву Закарпатської низовини, сучасних підходів до ґрунтово-екологічного моніторингу та можливостей використання результатів досліджень у професійній підготовці фахівців географічного профілю в контексті сталого розвитку територій.

1. Ґрунтовий покрив Закарпатської низовини: генетико-географічна та еколого-функціональна характеристика

Ґрунтовий покрив визначає функціонування ландшафтів, продуктивність агроекосистем та екологічну стійкість територій. Згідно із сучасними підходами, ґрунт трактується як багатофункціональна природна система, що виконує екологічні, економічні та соціальні функції. Тому його дослідження є необхідною умовою раціонального природокористування і досягнення цілей сталого розвитку[10, 11]. Визнання ґрунтів стратегічним ресурсом закріплено в Стратегії ЄС щодо ґрунтів до 2030 року, де вони визначаються базисом продовольчої безпеки, біорізноманіття та кліматичної стійкості[12]. Подальший розвиток цих положень втілено в Директиві (ЄС) 2025/2360 про моніторинг ґрунтів та стійкість, яка встановлює уніфіковану методологію оцінювання та стандартизовані процедури моніторингу. Ухвалення цих документів засвідчує перехід до інтегрованого управління ґрунтовими ресурсами на основі сучасних наукових даних і засад сталого розвитку[13].

---

[9] Ляшенко О. М. Сталий розвиток закладів вищої освіти: локальні інформаційно-комунікативні аспекти. *Вчені записки Університету «КРОК»*. 2020. № 2 (58). С. 97–102. https://doi.org/10.31732/2663-2209-2020-58-97-102.

[10] Позняк С. П., Гавриш Н. С. Роль ґрунтів у розвитку суспільства. *Український географічний журнал*. 2019. № 2. С. 57–61. https://doi.org/10.15407/ugz2019.02.057.

[11] Status of the World's Soil Resources (SWSR) – Main Report / FAO, ITPS. Rome : Food and Agriculture Organization of the United Nations ; Intergovernmental Technical Panel on Soils, 2015. 650 p.

[12] Генеральний директорат з питань навколишнього середовища Європейської комісії. Стратегія ЄС щодо ґрунтів на період до 2030 року – На шляху до здорових ґрунтів для людей і планети. Брюссель : Бюро публікацій Європейського Союзу, 2021. URL: https://data.europa.eu/doi/10.2779/629859.

[13] Директива (ЄС) 2025/2360 Європейського Парламенту та Ради від 12 листопада 2025 року про моніторинг ґрунтів та стійкість (Закон про моніторинг ґрунтів). *Official Journal of the European Union*. 2025. L 2025/2360. URL: http://data.europa.eu/eli/dir/2025/2360/oj.

У цьому контексті особливої уваги заслуговує Закарпатська низовина. Її складна геологічна будова, різноманітність алювіальних відкладів, високий рівень зволоження та інтенсивне господарське освоєння створили передумови для формування одного з наймозаїчніших ґрунтових покривів серед рівнинних територій України. Своєрідність природних умов регіону визначається поєднанням теплого помірно вологого клімату, потужної товщі алювію різного гранулометричного складу та близького залягання ґрунтових вод. Взаємодія цих чинників разом із паводками, русловими процесами та історичним впливом широколистяних і заплавних лісів зумовила розвиток дернового, підзолистого, алювіального та глейового процесів ґрунтотворення[14]. Як наслідок, сформувалася складна генетико-географічна структура, де на незначних відстанях поєднуються автоморфні, напівгідроморфні й гідроморфні ґрунти, а процеси оглеєння стали їхньою характерною діагностичною ознакою[15, 16]. Усе це робить ґрунтовий покрив регіону важливим об'єктом для комплексних ґрунтово-екологічних досліджень.

Дернові опідзолені ґрунти займають найбільші площі у структурі ґрунтового покриву Закарпатської низовини та сформувалися переважно на давньоалювіальних відкладах високих терас. Їхній генезис пов'язаний із поєднанням дернового та слабкого підзолистого процесів за умов достатнього атмосферного зволоження й широколистяної рослинності. Для цих ґрунтів характерні слабка генетична диференціація профілю, помірний вміст гумусу, кисла реакція ґрунтового розчину та невисока забезпеченість рухомими формами окремих елементів живлення, що обумовлює необхідність застосування науково обґрунтованих заходів хімічної меліорації та систематичного відтворення родючості[17, 18]. Водночас результати досліджень агрофізичного стану дернових ґрунтів Закарпатської низовини засвідчують, що їхні сучасні властивості значною мірою визначаються не лише природними чинниками ґрунтотворення, а й інтенсивністю господарського використання. За даними В. Г. Гаськевича та Р. Б. Семащука, тривале сільськогосподарське освоєння супроводжується

---

[14] Лісові ґрунти. Ґрунти Закарпатської низовини. *Регіональний інформаційний центр «Карпати»*. URL: https://carpaty.net/?p=31024.

[15] Орлов О. Л., Вовк О. Б. Різноманіття та особливості поширення ґрунтів Закарпатської низовини. *Науковий вісник Ужгородського університету. Серія: Біологія*. 2010. Вип. 28. С. 147–151. URL: https://dspace.uzhnu.edu.ua/jspui/handle/lib/7848.

[16] Лісові ґрунти. Ґрунти Закарпатської низовини. *Регіональний інформаційний центр «Карпати»*. URL: https://carpaty.net/?p=31024.

[17] Закарпатський регіональний центр державної установи «Інститут охорони ґрунтів України». Офіційний сайт. URL: https://www.iogu.gov.ua/center_zk.

[18] Еколого-агрохімічна оцінка ґрунтів Закарпаття / Ю. Ю. Бандурович та ін. *Родючість і охорона ґрунтів*. 2017. № 4. С. 46–52. https://doi.org/10.33730/2077-4893.4.2017.219728.

погіршенням структурно-агрегатного стану, збільшенням щільності будови орного шару, зменшенням загальної пористості та водопроникності, що негативно позначається на повітряному й водному режимах ґрунтів та підвищує ризики їхньої фізичної деградації[19].

У понижених елементах рельєфу, де рівень ґрунтових вод розташований близько до поверхні, поширені дернові оглеєні ґрунти, розвиток яких відбувається за одночасної дії процесів опідзолення й оглеєння. Для них характерні ознаки періодичних окисно-відновних процесів, що проявляються у формуванні сизуватих і вохристих плям у профілі. В умовах надмірного зволоження й ущільнення окремих горизонтів погіршується аерація, знижується водопроникність і сповільнюється біологічна активність цих ґрунтів. За таких умов ефективне використання земель можливе лише за умови регулювання водного режиму, оптимізації систем обробітку та застосування комплексу меліоративних заходів[20].

Поряд із дерновими ґрунтами важливе місце у структурі ґрунтового покриву посідають алювіальні, лучні та лучно-болотні ґрунти, поширення яких приурочене до сучасних і давніх заплав річок Тиси, Латориці, Боржави, Ужа та інших водотоків. Їх формування безпосередньо пов'язане із сучасними алювіальними процесами, регулярним надходженням дрібнозему під час паводків та високим рівнем стояння ґрунтових вод. Саме ці ґрунти забезпечують надзвичайно високу просторову мозаїчність ґрунтового покриву Закарпатської низовини[21]. Лучні ґрунти характеризуються значною потужністю гумусового горизонту, високою природною родючістю та відносно сприятливими фізичними властивостями. Разом із тим їхній водний режим є нестійким, а тривале перезволоження спричиняє розвиток оглеєння, що негативно впливає на аерацію кореневмісного шару й обмежує можливості вирощування окремих сільськогосподарських культур. Лучно-болотні ґрунти формуються в найнижчих елементах рельєфу за умов постійного надлишкового зволоження. Для них характерні виражені ознаки гідроморфізму, значний вміст органічної речовини та висока здатність до акумуляції вуглецю. Утім, господарське використання цих ґрунтів можливе лише

[19] Гаськевич В. Г., Семащук Р. Б. Агрофізичний стан дернових ґрунтів Закарпатської низовини. *Вісник Одеського національного університету. Серія: Географічні та геологічні науки*. 2017. Т. 22, вип. 1 (30). С. 86–101. https://doi.org/10.18524/2303-9914.2017.1(30).116820.

[20] Орлов О. Л., Вовк О. Б. Різноманіття та особливості поширення ґрунтів Закарпатської низовини. *Науковий вісник Ужгородського університету. Серія: Біологія*. 2010. Вип. 28. С. 147–151. URL: https://dspace.uzhnu.edu.ua/jspui/handle/lib/7848.

[21] Закарпатський регіональний центр державної установи «Інститут охорони ґрунтів України». Офіційний сайт. URL: https://www.iogu.gov.ua/center_zk.

після проведення відповідних гідротехнічних і меліоративних заходів. Узагальнену характеристику домінуючих типів ґрунтів Закарпатської низовини наведено в таблиці 1.

Таблиця 1

Характеристика домінуючих типів ґрунтів Закарпатської низовини[22]

Тип ґрунту	Поширеність (%, за експертними оцінками)	Ландшафтна позиція	Водний режим	Агроекологічні особливості
Дернові ґрунти: – опідзолені – оглеєні	~ 50–55 % ~ 15–20 %	високі тераси надзаплавні тераси	автоморфний	кисла реакція (опідзолені), ризик тимчасового перезволоження (оглеєні); потребують вапнування, внесення добрив та регулювання водного режиму
Лучні ґрунти	~ 15 %	понижені елементи рельєфу, заплави	напівгідроморфний	висока природна родючість, ризик сезонного перезволоження, необхідність дренажу та захисту від переущільнення
Лучно-болотні ґрунти	~ 10–15 %	мікрозниження	гідроморфний	обмежене використання; високий ризик оглеєння та перезволоження; потребують осушення і захисту від деградації

Отже, аналіз просторової структури ґрунтового покриву Закарпатської низовини свідчить, що його неоднорідність визначається насамперед геоморфологічною будовою території, особливостями сучасних алювіальних процесів та гідрологічним режимом річкових долин. Саме тому навіть у межах невеликих територій спостерігається різка зміна ґрунтових відмін, що суттєво ускладнює їх картографування й оцінювання агроекологічного потенціалу.

Характерною особливістю ґрунтового покриву низовини є поєднання високої природної продуктивності з підвищеною екологічною вразливістю. Більшість дернових ґрунтів характеризується достатньою

[22] Закарпатський регіональний центр державної установи «Інститут охорони ґрунтів України». Офіційний сайт. URL: https://www.iogu.gov.ua/center_zk.

потужністю гумусового горизонту, однак їх агровиробничі властивості істотно обмежуються кислою реакцією ґрунтового розчину, недостатнім забезпеченням рухомими формами фосфору та схильністю до ущільнення нижніх горизонтів. За результатами агрохімічних досліджень, для значної частини орних земель території дослідження характерні показники кислотності в межах pH 4,8–5,5, що потребує систематичного вапнування та підтримання оптимального водно-повітряного режиму[23]. З огляду на це ефективне використання земельних ресурсів регіону повинно ґрунтуватися на диференційованому підході до ведення землеробства, який враховує генетичні особливості кожного типу ґрунтів.

Не менш важливими є еколого-функціональні властивості ґрунтів Закарпатської низовини. Крім забезпечення сільськогосподарського виробництва, вони виконують низку екосистемних функцій, серед яких особливе значення мають регулювання поверхневого та підземного стоку, акумуляція органічної речовини, депонування вуглецю, підтримання біогеохімічних циклів і збереження біорізноманіття. Зазначені функції розглядаються міжнародною науковою спільнотою як основа сталого управління земельними ресурсами й екологічної безпеки територій[24]. Так, у настановах щодо сталого управління ґрунтами (Voluntary Guidelines for Sustainable Soil Management) наголошується, що підтримання природних функцій ґрунтів повинно стати одним із пріоритетів державної екологічної політики, а заходи з використання земель мають забезпечувати не лише економічну ефективність, а й довгострокове збереження ґрунтових ресурсів[25].

Для Закарпатської низовини ці положення мають особливе значення з огляду на її розташування в басейні річки Тиси, де ґрунтовий покрив бере безпосередню участь у регулюванні водного режиму, формуванні паводкового стоку та підтриманні екологічної рівноваги заплавних екосистем. Лучні й лучно-болотні ґрунти виконують функцію природних акумуляторів вологи, сприяють затриманню поверхневого стоку й очищенню природних вод від забруднювальних речовин. Водночас ущільнення орного шару, осушувальні меліорації та надмірна інтенсифікація землекористування призводять до поступової втрати цих функцій, що негативно позначається на стійкості природних комплексів

[23] Еколого-агрохімічна оцінка ґрунтів Закарпаття / Ю. Ю. Бандурович та ін. *Родючість і охорона ґрунтів*. 2017. № 4. С. 46–52. https://doi.org/10.33730/2077-4893.4.2017.219728.

[24] Status of the World's Soil Resources (SWSR) – Main Report / FAO, ITPS. Rome : Food and Agriculture Organization of the United Nations ; Intergovernmental Technical Panel on Soils, 2015. 650 p.

[25] FAO. Voluntary Guidelines for Sustainable Soil Management. Rome : Food and Agriculture Organization of the United Nations, 2017. URL: https://openknowledge.fao.org/3/i6874en/i6874en.pdf.

регіону[26]. Тому сучасні дослідження ґрунтового покриву Закарпатської низовини дедалі більше орієнтуються на комплексне оцінювання не лише показників родючості, а й екологічного стану ґрунтів, їх функціональної ролі в ландшафтах та здатності забезпечувати стале використання природних ресурсів. Такий підхід повністю відповідає сучасній концепції ґрунтово-екологічного моніторингу, відповідно до якої об'єктом оцінювання є не окремі агрохімічні показники, а функціонування ґрунту як цілісної природної системи[27, 28].

Складна генетична будова, просторова неоднорідність і висока екологічна чутливість ґрунтового покриву Закарпатської низовини роблять цей регіон важливим природним полігоном для підготовки майбутніх фахівців географічного профілю. Різноманіття умов ґрунтотворення, контрастність фізико-хімічних властивостей та антропогенне навантаження створюють широкі можливості для комплексного вивчення закономірностей функціонування природних систем. Відповідно до сучасних вимог вищої освіти, детальна характеристика та просторовий розподіл зазначених типів ґрунтів формують надійну науково-практичну базу для організації навчально-дослідницької роботи студентів. Це дає змогу майбутнім географам не лише опанувати навички польової діагностики та геоекологічного моніторингу, а й здобути готовність обґрунтовувати стратегії сталого природокористування в регіоні.

2. Трансформація підходів до землекористування та організація моніторингу ґрунтового покриву регіону

Ґрунтовий покрив є фундаментальною основою земельного фонду та базовим компонентом ландшафтів, що визначає їхню екологічну стабільність і продуктивність. Саме тому раціональне використання земельних ресурсів належить до пріоритетних напрямів сучасної екологічної політики та є важливим чинником забезпечення сталого розвитку територій. Упродовж останнього століття концепції землекористування зазнали істотної трансформації, перейшовши від технократичної моделі, орієнтованої на максимальне господарське освоєння природного середовища, до екосистемного підходу, який передбачає збереження природного потенціалу земель і підтримання

[26] Орлов О. Л., Вовк О. Б. Різноманіття та особливості поширення ґрунтів Закарпатської низовини. *Науковий вісник Ужгородського університету. Серія: Біологія*. 2010. Вип. 28. С. 147–151. URL: https://dspace.uzhnu.edu.ua/jspui/handle/lib/7848.

[27] Стратегія збалансованого використання, відтворення і управління ґрунтовими ресурсами України / за ред. С. А. Балюка, В. В. Медведєва. Київ : Аграрна наука, 2012. 240 с.

[28] Медведєв В. В. Моніторинг ґрунтів України. Концепція. Підсумки. Завдання. 2-ге вид., перегл. і допов. Харків : КП «Міська друкарня», 2012. 536 с.

екологічних функцій ґрунтів. Така зміна наукової парадигми стала прямим наслідком усвідомлення масштабів деградації ґрунтового покриву та гострої необхідності його збалансованого використання[29]. У межах Закарпатської низовини ці процеси набувають особливого змісту через поєднання високого аграрного потенціалу, складних природних умов та інтенсивного антропогенного впливу. Просторова неоднорідність території та чутливість її ландшафтів до господарського втручання зумовлюють нагальну потребу в оптимізації використання земельних ресурсів з урахуванням екологічних особливостей регіону.

Так, у другій половині XX століття господарське освоєння Закарпатської низовини супроводжувалося масштабними меліоративними роботами, осушенням заболочених земель, регулюванням русел річок і створенням осушувальних систем. Такі заходи забезпечили розширення площ сільськогосподарських угідь, однак разом із тим порушили природний гідрологічний режим території, що негативно позначилося на перебігу ґрунтотворних процесів, властивостях ґрунтів та функціонуванні заплавних екосистем. Після припинення системної експлуатації більшості меліоративних мереж на окремих територіях розпочалося часткове відновлення природного водного режиму, що підтвердило визначальну роль природних чинників у ландшафтах. Про руйнівні наслідки такого втручання та необхідність збереження водно-болотних угідь як природних регуляторів гідрологічного режиму й осередків біорізноманіття задовго до сучасних екологічних дискусій застерігав видатний дослідник краю професор Василь Комендар[30]. Накопичений досвід господарського освоєння території засвідчив обмеженість технократичної моделі землекористування, орієнтованої переважно на короткострокове підвищення продуктивності земель. Натомість сучасні підходи ґрунтуються на принципах сталого природокористування, які передбачають поєднання економічної ефективності зі збереженням екологічних функцій ґрунтового покриву, підтриманням біорізноманіття, регулюванням водного режиму та накопиченням органічного вуглецю[31].

Сучасний стан ґрунтового покриву Закарпатської низовини є результатом тривалої взаємодії природних факторів і антропогенного навантаження. Тривала інтенсивна експлуатація земель призвела

[29] Стратегія збалансованого використання, відтворення і управління ґрунтовими ресурсами України / за ред. С. А. Балюка, В. В. Медведєва. Київ : Аграрна наука, 2012. 240 с.

[30] Закарпатське болото. У радянські часи його майже позбулися… RegNews. URL: https://regnews.com.ua/photo/zakarpatske-boloto-u-radyanski-chasi-jjogo-majjzhe-pozbulysya/.

[31] Балюк С. А., Кучер А. В. Просторові особливості ґрунтового покриву як основа сталого управління ґрунтами. *Український географічний журнал.* 2019. № 3. С. 3–14. https://doi.org/10.15407/ugz2019.03.003.

до розвитку низки деградаційних процесів, інтенсивність яких безпосередньо залежить від характеру землекористування та природних особливостей території, що зумовлює потребу в їхньому систематичному моніторингу[32]. Переосмислення наслідків інтенсивного використання земель сприяло утвердженню концепції сталого розвитку, відповідно до якої ґрунтовий покрив розглядається не лише як засіб сільськогосподарського виробництва, а як складний природний компонент, що забезпечує функціонування екосистем, регулює кругообіг речовин і води, акумулює органічний вуглець та підтримує екологічну рівновагу ландшафтів[33].

Формування сучасної концепції сталого землекористування тісно пов'язане із загальносвітовими тенденціями щодо збереження ґрунтових ресурсів як важливого компонента біосфери. Стратегічні орієнтири в цій сфері сьогодні визначає Європейський зелений курс (European Green Deal)[34], який передбачає скорочення деградації земель, збереження органічної речовини, підвищення біологічного різноманіття агроландшафтів та впровадження екологічно безпечних технологій виробництва. Якщо європейська модель активізує точне землеробство та мінімізацію пестицидного навантаження, то господарювання на території Закарпатської низовини поки що перебуває на початковій стадії адаптації до цих вимог. Для регіону реалізація принципів сталого землекористування має особливе значення з огляду на високу природну неоднорідність і чутливість ландшафтів до антропогенного тиску. Оскільки різні типи ґрунтів демонструють неоднакову стійкість, універсальні моделі господарювання поступаються місцем диференційованому управлінню, що враховує генетично-морфологічні особливості та водно-екологічний режим земель.

Дієвим інструментом екоорієнтованого господарювання виступає регенеративне землеробство, яке фокусується на відновленні потенціалу ґрунтів за допомогою мінімізації оранки, використанні сидератів та активізації ґрунтових біоценозів[35]. Водночас ефективне управління земельними ресурсами в аграрному секторі України потребує не лише

---

[32] Медведєв В. В. Моніторинг ґрунтів України. Концепція. Підсумки. Завдання. 2-ге вид., перегл. і допов. Харків : КП «Міська друкарня», 2012. 536 с.

[33] Балюк С. А., Кучер А. В., Максименко Н. В. Ґрунтові ресурси України: стан, проблеми і стратегія сталого управління. *Український географічний журнал*. 2021. № 2. С. 3–11. https://doi.org/10.15407/ugz2021.02.003

[34] European Commission. The European Green Deal. Brussels, 2019. URL: https://ec.europa.eu/info/strategy/priorities-2019-2024/european-green-deal_en.

[35] Baritz R., Wiese L., Verbeke I., Vargas R. Voluntary Guidelines for Sustainable Soil Management: Global Action for Healthy Soils. *International Yearbook of Soil Law and Policy*. 2017. P. 17–36. https://doi.org/10.1007/978-3-319-68885-5_3.

технологічного оновлення, а й удосконалення інституційних механізмів, розвитку екологічного планування та взаємодії між наукою, владою і землекористувачами[36]. Проте специфікою Закарпатської низовини є переважання дрібнотоварних господарств, технічні та ресурсні можливості яких суттєво обмежують масове впровадження інноваційних ґрунтозахисних практик. Як наслідок, без державної підтримки та системного поширення таких заходів збереження ґрунтів в регіоні відбуватиметься повільно, а адаптація до європейських агростандартів матиме переважно локальний і фрагментарний характер.

Окрім аграрних проблем, ґрунтовий покрив низовини зазнає інтенсивного антропогенного тиску внаслідок урбанізації, що призводить до його незворотної трансформації. Розширення меж населених пунктів і розвиток транспортної та виробничої інфраструктури супроводжуються вилученням із сільськогосподарського використання продуктивних земель, що особливо відчутно в приміських зонах Ужгорода, Мукачева, Чопа та інших міст регіону. За відсутності комплексного просторового планування такі процеси призводять до незворотної втрати цінних ґрунтових ресурсів та зниження екологічної стійкості агроландшафтів, що підтверджується кількісними оцінками ефективності землекористування в умовах інерційних сценаріїв розвитку[37].

Трансформація підходів до землекористування закономірно зумовила зміну принципів оцінювання стану ґрунтового покриву. Якщо традиційні підходи були зосереджені переважно на визначенні рівня родючості земель, то сучасні дослідження орієнтовані на комплексне оцінювання екологічного стану ґрунтів, прогнозування деградаційних процесів і наукове обґрунтування управлінських рішень. Саме тому ґрунтово-екологічний моніторинг сьогодні розглядається як один із ключових інструментів реалізації принципів сталого землекористування[38]. Перехід до адаптивної моделі землекористування неможливий без створення ефективної системи спостережень за станом ґрунтів. Ґрунтово-екологічний моніторинг є комплексною системою безперервних спостережень, оцінювання та прогнозування змін властивостей ґрунтів

[36] Сталий розвиток – XXI століття. Дискусії 2020 : колективна монографія / за ред. проф. Є. В. Хлобистова. Київ : Національний університет «Києво-Могилянська академія», 2020. 476 с. URL: https://surl.li/fvhqlx.

[37] Mamonov K., Kondrashchenko E., Pilicheva M., Goi V. A scenario approach to ensuring the territorial development of land use in regions. *Комунальне господарство міст*. 2024. № 187. С. 195–198. https://doi.org/10.33042/2522-1809-2024-1-182-35-42.

[38] Третяк А. М., Третяк Р. А., Третяк Н. А. Екологічні проблеми управління земельними ресурсами та землекористуванням у процесі здійснення земельної реформи в Україні. *Землеустрій, кадастр і моніторинг земель.* 2015. № 2–3. С. 13–19. URL: http://nbuv.gov.ua/UJRN/Zemleustriy_2015_2-3_4.

під впливом природних і антропогенних чинників[39]. На відміну від традиційних агрохімічних обстежень, він охоплює дослідження фізичних, фізико-хімічних, хімічних, біологічних і морфологічних показників, аналіз просторової структури ґрунтового покриву та виявлення тенденцій розвитку деградаційних процесів[40]. Методологічною основою сучасного ґрунтово-екологічного моніторингу є комплексне поєднання польових, лабораторних та камеральних методів дослідження, що забезпечує всебічне оцінювання властивостей ґрунтів і закономірностей їх функціонування[41].

Висока просторова мозаїчність ґрунтового покриву досліджуваної території, яка визначається особливостями мікрорельєфу, літології та гідрологічного режиму, зумовлює виняткову роль польових обстежень. У таких умовах детальні польові та лабораторні дослідження виступають необхідною передумовою достовірного картографування й об'єктивного оцінювання ступеня антропогенної трансформації земель.

Важливою рисою сучасного моніторингу є принцип багаторівневої діагностики, що передбачає аналіз не лише окремого профілю, а й ландшафтної організації території загалом. Це дає змогу розглядати ґрунтовий покрив як цілісну природну систему та виявляти закономірності його просторової диференціації[42].

Суттєво розширили можливості ґрунтово-екологічного моніторингу сучасні цифрові технології. Як зазначають Т. Ямелинець та співавтори, розроблена ґрунтова інформаційна система для Українських Карпат, що базується на використанні великомасштабних ґрунтових карт та ГІС-інструментів, дає можливість ефективно здійснювати моніторинг і прогнозування змін ґрунтового покриву[43]. На практиці такі рішення вже впроваджуються через комплексні платформи супутникової аналітики, як-от EOS Data Analytics, які дають змогу інтегрувати дані про типи ґрунтів, кліматичні умови, фази розвитку рослин та

---

[39] Стратегія збалансованого використання, відтворення і управління ґрунтовими ресурсами України / за ред. С. А. Балюка, В. В. Медведєва. Київ : Аграрна наука, 2012. 240 с.

[40] Третяк А. М., Третяк Р. А., Третяк Н. А. Екологічні проблеми управління земельними ресурсами та землекористуванням у процесі здійснення земельної реформи в Україні. *Землеустрій, кадастр і моніторинг земель*. 2015. № 2–3. С. 13–19. URL: http://nbuv.gov.ua/UJRN/Zemleustriy_2015_2-3_4.

[41] Визначник еколого-генетичного статусу та родючості ґрунтів України : навчальний посібник / М. І. Полупан та ін. Київ : Колообіг, 2005. 304 с.

[42] Медведєв В. В. Моніторинг ґрунтів України. Концепція. Підсумки. Завдання. 2-ге вид., перегл. і допов. Харків : КП «Міська друкарня», 2012. 536 с.

[43] Ямелинець Т., Паньків З., Телегуз О., Бонішко О. Ґрунтова інформаційна система Українських Карпат. *Проблеми геоморфології і палеогеографії Українських Карпат і прилеглих територій*. 2024. Вип. 2 (17). С. 3–13. https://doi.org/10.30970/gpc.2024.2.4552.

прогнозувати врожайність у цифровому форматі[44]. Картографування якісних показників ґрунтів Закарпатської низовини дає змогу виділити зони з різним рівнем екологічного ризику. Зокрема, дослідження з ідентифікації потенційно ерозійнонебезпечних територій у Карпатському регіоні підтверджують ефективність такого підходу для прийняття управлінських рішень[45]. Розроблення ґрунтових інформаційних систем і цифрових баз даних забезпечує постійне оновлення інформації, інтеграцію результатів моніторингових досліджень та підвищує ефективність прогнозування змін.

Водночас використання цифрових технологій не замінює класичних методів ґрунтознавства, а суттєво підвищує їхню ефективність. Польові дослідження залишаються основою для перевірки достовірності дистанційних даних, калібрування цифрових моделей та інтерпретації результатів просторового аналізу. Саме інтеграція традиційних методів із сучасними геоінформаційними технологіями забезпечує комплексність ґрунтово-екологічного моніторингу і створює наукову основу для обґрунтування раціонального використання земельних ресурсів. Важливим аспектом таких досліджень є поєднання моніторингової діяльності з підготовкою майбутніх фахівців природничого профілю. Участь здобувачів освіти в польових дослідженнях та роботі з ГІС-технологіями сприяє формуванню практичних компетенцій і одночасно забезпечує накопичення регіональної бази даних.

Отже, трансформація концепцій землекористування від технократичної моделі до принципів сталого природокористування зумовила перехід до багаторівневого ґрунтово-екологічного моніторингу. Для Закарпатської низовини з її високою просторовою неоднорідністю та чутливістю до антропогенного тиску впровадження таких підходів є необхідною передумовою збереження родючості ґрунтів і підтримання екологічної стійкості агроландшафтів. Водночас інтеграція науки й освітнього процесу на базі профільних підрозділів ДВНЗ «Ужгородський національний університет» створює надійну основу для наукового обґрунтування управлінських рішень у сфері сталого землекористування регіону.

---

[44] Біда П. І., Василюк-Полюшек М. О. Інновації моніторингу земель: ГІС-технології, агрономія та сталі аспекти землекористування. *Вісник Національного університету водного господарства та природокористування*. Серія «Сільськогосподарські науки». 2025. № 3 (107). С. 3–15. https://doi.org/10.31713/vs320241.

[45] Гнатюк О., Іванюк А., Могитич В., Вовк А. Ідентифікація зон ерозійного ризику в лісах Карпат з використанням ГІС-методів. *GeoTerrace-2024*. Львів, 2024. С. 1–5. URL: https://eage.in.ua/wp-content/uploads/2024/09/GeoTerrace-2024-039.pdf.

3. Практико-орієнтована підготовка майбутніх фахівців географічного профілю на основі ґрунтово-екологічного моніторингу

У сучасних умовах розвитку вищої освіти професійна підготовка майбутніх фахівців географічного профілю ґрунтується на компетентнісному підході, який передбачає не лише засвоєння системи теоретичних знань, а й формування здатності застосовувати їх для розв'язання реальних професійних завдань. Як визначено в Законі України «Про вищу освіту», пріоритетним завданням закладів вищої освіти є формування у здобувачів навичок здійснення дослідницької діяльності та прийняття науково обґрунтованих рішень у сфері майбутньої професійної діяльності[46]. Реалізація цих вимог вимагає органічного поєднання фундаментальної природничої підготовки з польовими дослідженнями, лабораторними аналізами, картографуванням і використанням сучасних геоінформаційних технологій. Такий підхід відповідає новітнім вимогам ринку праці, європейським тенденціям розвитку освіти та концепції навчання впродовж життя, відповідно до яких випускник повинен володіти професійними, дослідницькими, цифровими та комунікативними компетентностями, необхідними для ефективної діяльності у сфері природокористування, охорони довкілля, землеустрою і просторового планування[47].

Практико-орієнтована підготовка майбутніх географів передбачає інтеграцію теоретичного навчання з польовими дослідженнями, лабораторними роботами, геоінформаційним аналізом і самостійною науково-дослідною діяльністю. Така система навчання забезпечує поступовий перехід від засвоєння академічних знань до набуття практичного досвіду та формування професійної готовності до вирішення комплексних еколого-економічних і землевпорядних завдань. Як зазначають Н. Мукан, Н. Чубинська та Г. Чжунцзюнь, компетентнісний підхід у сучасній вищій освіті орієнтований насамперед на розвиток здатності застосовувати міждисциплінарні знання, критичне мислення й дослідницькі навички для розв'язання практичних проблем[48].

Важливим інструментом реалізації такого підходу є ґрунтово-екологічний моніторинг, який поєднує польові спостереження, лабораторні

[46] Про вищу освіту: Закон України від 01.07.2014 № 1556-VII. URL: https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/1556-18.

[47] Hisey F., Lin V., Zhu T. Integrating Sustainability Reflection in a Geographic Information Science Capstone Project Course. *Geomatics*. 2025. Vol. 5, iss. 2. P. 20. https://doi.org/10.3390/geomatics5020020.

[48] Mukan N., Chubinska N., Zhongjun G. Компетентнісний підхід у вищій освіті: основні поняття та категорії. *Академічні візії*. 2023. № 17. http://dx.doi.org/10.5281/zenodo.8177296.

дослідження, геоінформаційні технології та аналіз просторових даних. Участь студентів у моніторингових дослідженнях забезпечує проходження всіх етапів наукової роботи – від постановки дослідницької проблеми та планування польових досліджень до обробки результатів, їхньої просторової інтерпретації та розроблення рекомендацій щодо раціонального використання земельних ресурсів. Така організація освітнього процесу сприяє інтеграції теоретичної підготовки з практикою та розвитку дослідницького мислення майбутніх фахівців[49].

Важливе місце у формуванні професійних компетентностей посідає використання сучасних цифрових технологій. Поєднання геоінформаційних систем, дистанційного зондування Землі та цифрового картографування значно розширює можливості аналізу природних процесів, дає змогу інтегрувати результати польових і лабораторних досліджень у єдине інформаційне середовище, здійснювати просторове моделювання та прогнозувати зміни стану природних компонентів. Дослідження А. С. Лесик і К. В. Коваль свідчать, що використання ГІС-технологій у поєднанні з проєктною діяльністю сприяє формуванню рефлексивно-прогностичної компетентності майбутніх бакалаврів географії[50]. Аналогічну позицію висловлює А. В. Руденко, наголошуючи на необхідності інтеграції цифрових технологій із самостійною дослідницькою діяльністю студентів[51]. Результати міжнародних досліджень також підтверджують, що використання геоінформаційних технологій у навчальному процесі сприяє розвитку системного мислення, рефлексії та здатності прогнозувати зміни природного середовища[52, 53].

Тому сучасна модель підготовки майбутніх фахівців географічного профілю орієнтована на поєднання теоретичного навчання з практичною діяльністю, а ґрунтово-екологічний моніторинг виступає ефективною

[49] Захаров О. О. Методологічні рекомендації щодо вивчення вищої географічної освіти в Україні в умовах викликів війни та освітніх трансформацій. *Економічна та соціальна географія*. 2025. Вип. 94. С. 134–146. https://doi.org/10.17721/2413-7154/2025.94.7.

[50] Лесик А. С., Коваль К. В. Теоретичні засади формування рефлексивно-прогностичної компетентності у майбутніх бакалаврів з географії: вітчизняний та закордонний досвід. *Перспективи та інновації науки*. 2025. № 1 (47). С. 641–650. URL: https://dspace.bdpu.org.ua/handle/123456789/4424.

[51] Руденко А. В. Методологічні підходи формування рефлексивно-прогностичної компетентності майбутніх бакалаврів з географії у змішаному навчанні. *Pedagogical Academy: Scientific Notes*. 2024. № 13. https://doi.org/10.5281/zenodo.14782211.

[52] Harvey M., Walkerden G., Semple A., McLachlan K., Lloyd K., Bosanquet A. Reflecting on reflective practice: issues, possibilities and guidance principles. *Higher Education Research & Development*. 2025. https://doi.org/10.1080/07294360.2025.2463517.

[53] Hisey F., Lin V., Zhu T. Integrating Sustainability Reflection in a Geographic Information Science Capstone Project Course. *Geomatics*. 2025. Vol. 5, iss. 2. P. 20. https://doi.org/10.3390/geomatics5020020.

педагогічною технологією формування професійних компетентностей. Його використання забезпечує розвиток польових, лабораторних, аналітичних, цифрових і дослідницьких умінь, необхідних для майбутньої професійної діяльності. Саме такий підхід успішно реалізується в освітньому процесі на географічному факультеті ДВНЗ «Ужгородський національний університет», де природне різноманіття Закарпатської низовини слугує надійною базою для практичної підготовки студентів.

Практико-орієнтована підготовка майбутніх фахівців географічного профілю найбільш ефективно реалізується за умови поєднання польових, лабораторних і камеральних досліджень у єдиний освітній цикл. Така організація навчального процесу не лише забезпечує засвоєння методик дослідження ґрунтового покриву, а й формує цілісне розуміння закономірностей функціонування геосистем, взаємозв'язків між компонентами ландшафту й особливостей їх трансформації під впливом природних і антропогенних чинників. Інтеграція всіх етапів дослідження дає змогу студентам набути практичного досвіду виконання повного циклу наукової роботи – від збору первинної інформації до її аналізу, просторової інтерпретації та розроблення практичних рекомендацій[54].

Фундаментом такої підготовки є безпосереднє ознайомлення здобувачів із природними умовами території на місцевості. Під час польової роботи вони опановують навички маршрутного обстеження, вибору ключових ділянок, закладання розрізів та відбору зразків із сучасною GPS-геоприв'язкою, що забезпечує подальшу інтеграцію результатів у цифрові бази даних. Це формує просторове мислення і здатність аналізувати взаємозв'язки між рельєфом, рослинністю, літологією та властивостями ґрунтів, які є основою професійної діяльності. Наступним етапом є лабораторне опрацювання відібраних зразків для визначення фізико-хімічних і екологічних показників ґрунтів. Це дає змогу здобувачам опанувати сучасні методики й навчитися інтерпретувати результати відповідно до ландшафтних умов території. Синтез польових і лабораторних даних забезпечує комплексну оцінку стану ґрунтового покриву, виявлення деградаційних процесів та визначення чинників антропогенної трансформації земель. Завершальним етапом є камеральне опрацювання матеріалів за допомогою сучасних геоінформаційних систем. На цьому етапі дані систематизуються, формуються електронні бази даних, виконується статистична обробка та створюються тематичні карти й просторові моделі, що дозволяє прогнозувати зміни екологічного стану території.

[54] Купач Т. Г., Дем'яненко С. О. Польові природничо-географічні дослідження територій : навчально-методичний посібник. Київ : ЦОП «Глобус», 2017. 80 с.

Відмітимо, що використання цифрових технологій не замінює традиційних методів польових досліджень, а доповнює їх, забезпечуючи комплексний характер ґрунтово-екологічного моніторингу. Польові спостереження залишаються основою перевірки результатів дистанційного зондування та геоінформаційного аналізу, тоді як цифрові інструменти значно розширюють можливості просторової інтерпретації отриманих даних. Такий підхід відповідає сучасним тенденціям розвитку географічної освіти та забезпечує формування професійних компетентностей, необхідних для роботи в галузі екологічного моніторингу, землеустрою та просторового планування[55, 56].

Практична реалізація компетентнісного підходу передбачає залучення студентів до виконання реальних дослідницьких завдань, результати яких мають не лише навчальне, а й прикладне значення. Це сприяє розвитку навичок самостійного прийняття рішень, критичного аналізу інформації та професійної відповідальності, а також формує готовність до комплексного оцінювання природних систем і розроблення науково обґрунтованих рекомендацій щодо раціонального використання земельних ресурсів[57, 58].

Регіональні особливості Закарпатської низовини створюють сприятливі умови для організації практико-орієнтованої підготовки майбутніх фахівців природничого профілю. Висока різноманітність ґрунтового покриву, строкатість геоморфологічних і гідрологічних умов та поєднання природних і антропогенно трансформованих ландшафтів дають змогу проводити комплексні ґрунтово-екологічні дослідження. На географічному факультеті ДВНЗ «Ужгородський національний університет» цей потенціал використовується під час освітнього процесу, практик, виконання курсових і кваліфікаційних робіт, а також у процесі реалізації кафедральних науково-дослідних тем (рис. 1).

---

[55] Лесик А. С., Коваль К. В. Теоретичні засади формування рефлексивно-прогностичної компетентності у майбутніх бакалаврів з географії: вітчизняний та закордонний досвід. *Перспективи та інновації науки*. 2025. № 1 (47). С. 641–650. URL: https://dspace.bdpu.org.ua/handle/123456789/4424.

[56] Hisey F., Lin V., Zhu T. Integrating Sustainability Reflection in a Geographic Information Science Capstone Project Course. *Geomatics*. 2025. Vol. 5, iss. 2. P. 20. https://doi.org/10.3390/geomatics5020020.

[57] Руденко А. В. Методологічні підходи формування рефлексивно-прогностичної компетентності майбутніх бакалаврів з географії у змішаному навчанні. *Pedagogical Academy: Scientific Notes*. 2024. № 13. https://doi.org/10.5281/zenodo.14782211.

[58] Максименко Н., Клєщ А. Потенціал практико-орієнтованого навчання в Living Labs у формуванні компетентностей природничих і аграрних спеціальностей. *Проблеми безперервної географічної освіти і картографії*. 2026. Вип. 43. С. 81–93. https://doi.org/10.26565/2075-1893-2026-43-09.



Рис. 1. Польові дослідження ґрунтового покриву під час навчальних практик та виконання кваліфікаційних робіт здобувачами освіти географічного факультету (2021–2026 рр.)

Важливим аспектом практико-орієнтованої моделі є міждисциплінарна інтеграція, завдяки якій здобувачі географічних, землевпорядних та лісогосподарських напрямів спільно опановують інструменти просторового аналізу, що дає змогу комплексно оцінювати стан земельних та лісових ресурсів регіону. Така організація освітнього процесу забезпечує безпосередній зв'язок між теоретичною підготовкою та практичною діяльністю, що відповідає сучасним вимогам компетентнісного навчання[59]. Водночас сам характер ґрунтово-екологічного моніторингу вимагає синтезу знань із ґрунтознавства, фізичної географії, картографії, ландшафтознавства та екології. Це сприяє формуванню системного бачення природних процесів, розвитку професійного мислення й умінню комплексно оцінювати взаємозв'язки між компонентами довкілля. Як засвідчує досвід, представлений С. Ю. Бортником, Т. М. Лаврук та О. М. Підковою, впровадження таких прикладних досліджень у навчальний процес є ефективним засобом формування фахових компетентностей і підвищення готовності здобувачів до майбутньої професійної діяльності[60].

Перспективним напрямом удосконалення практичної підготовки є використання інноваційних освітніх моделей, зокрема концепції Living Labs, яка поєднує освітню, наукову та практичну діяльність у реальному середовищі. За висновками Н. Максименко та А. Клєщ, така модель сприяє розвитку дослідницьких, цифрових та комунікативних компетентностей, забезпечуючи активну взаємодію студентів із природними об'єктами[61]. Використання окремих елементів цього підходу під час організації польових досліджень на території Закарпатської низовини посилює практичну спрямованість навчання та сприяє інтеграції університетської освіти з потребами регіонального розвитку.

В умовах сучасних екологічних викликів, пов'язаних зі змінами клімату, деградацією земель і трансформацією структури землекористування, особливого значення набуває підготовка фахівців, здатних здійснювати комплексне оцінювання стану природних систем та обґрунтовувати заходи

[59] Mukan N., Chubinska N., Zhongjun G. Компетентнісний підхід у вищій освіті: основні поняття та категорії. *Академічні візії*. 2023. № 17. http://dx.doi.org/10.5281/zenodo.8177296.

[60] Бортник С. Ю., Лаврук Т. М., Підкова О. М. Досвід формування фахових компетентностей географів у рамках освітньої програми «Ґрунтознавство, управління земельними ресурсами та територіальне планування». *Географічна наука та освіта: перспективи й інновації* : зб. матеріалів Міжнар. наук.-практ. конф. (Переяслав, 20–21 трав. 2021 р.) / редкол.: В. П. Коцур, Л. Г. Руденко, Є. О. Маруняк та ін. Переяслав (Київ. обл.), 2021. С. 21–26. URL: https://igu.org.ua/sites/default/files/igu-files/files-news/conf-igu-2021.pdf.

[61] Максименко Н., Клєщ А. Потенціал практико-орієнтованого навчання в Living Labs у формуванні компетентностей природничих і аграрних спеціальностей. *Проблеми безперервної географічної освіти і картографії*. 2026. Вип. 43. С. 81–93. https://doi.org/10.26565/2075-1893-2026-43-09.

щодо їх раціонального використання. Залучення студентів до виконання реальних моніторингових досліджень сприяє розвитку професійної відповідальності, навичок роботи в команді, академічної доброчесності та готовності застосовувати результати досліджень для вирішення практичних завдань у сфері природокористування[62, 63]. Використання результатів ґрунтово-екологічного моніторингу має не лише навчальне, а й прикладне значення. Отримані матеріали можуть використовуватися органами місцевого самоврядування, природоохоронними установами, землевпорядними організаціями та аграрними підприємствами під час оцінювання стану земельних ресурсів, планування природоохоронних заходів і прийняття управлінських рішень. Така взаємодія університету з регіональними стейкхолдерами сприяє впровадженню результатів наукових досліджень у практику та підвищує суспільну значущість професійної підготовки майбутніх фахівців природничого спрямування.

Отже, ґрунтово-екологічний моніторинг доцільно розглядати як ефективну практико-орієнтовану педагогічну технологію формування професійних компетентностей майбутніх фахівців географічного профілю. Поєднання польових, лабораторних і камеральних досліджень із використанням сучасних геоінформаційних технологій забезпечує розвиток професійних, дослідницьких, цифрових і комунікативних компетентностей, формує системне екологічне мислення та готовність до прийняття науково обґрунтованих рішень у сфері природокористування. Поступова реалізація такої моделі на території Закарпатської низовини засвідчує її актуальність і результативність, оскільки природне різноманіття краю та застосування сучасних методів моніторингу створюють надійну базу для підготовки конкурентоспроможних фахівців, здатних комплексно оцінювати стан земельних ресурсів і сприяти втіленню принципів сталого розвитку.

ВИСНОВКИ

Проведене дослідження засвідчило, що ґрунтовий покрив Закарпатської низовини є важливою природною основою для формування професійних компетентностей майбутніх фахівців географічного профілю. Значна різноманітність ґрунтів, зумовлена особливостями геологічної будови,

[62] Duffeck V., Popovych N., Borysenko K. Modern experience of training future geography teachers: comparative analysis (cases of two universities in the Czech Republic and Ukraine). *Scientific Notes of the Pedagogical Department*. 2024. № 53. С. 219–232. https://doi.org/10.31652/2415-7872-2024-53-219-232.

[63] Хвесик М. А., Голян В. А. Інституціональна модель природокористування в умовах глобальних викликів : монографія. Київ: Кондор, 2007. 480 с. URL: https://library.wunu.edu.ua/libsearch/DocDescription?doc_id=300899.

рельєфу, гідрологічного режиму та кліматичних умов території, створює сприятливі передумови для проведення комплексних ґрунтово-екологічних досліджень. Просторова неоднорідність ґрунтового покриву, поєднання природних і антропогенно трансформованих ландшафтів дають змогу використовувати територію Закарпатської низовини як природну навчально-наукову лабораторію для підготовки фахівців, здатних здійснювати комплексний аналіз геосистем.

Встановлено, що сучасні трансформації землекористування, посилення антропогенного навантаження та зростання екологічних викликів зумовлюють необхідність удосконалення підходів до ґрунтово-екологічного моніторингу. Його сучасна концепція передбачає інтеграцію традиційних польових і лабораторних методів із використанням геоінформаційних систем, дистанційного зондування Землі, цифрового картографування та просторового моделювання. Такий підхід забезпечує не лише оцінювання сучасного стану ґрунтового покриву, а й виявлення тенденцій його змін, прогнозування деградаційних процесів та розроблення науково обґрунтованих рекомендацій щодо раціонального використання земельних ресурсів.

Доведено, що ґрунтово-екологічний моніторинг має значний освітній потенціал і може розглядатися як ефективний інструмент практико-орієнтованої підготовки майбутніх фахівців географічного профілю. Поєднання польових досліджень, лабораторного аналізу, камерального опрацювання матеріалів та цифрових технологій забезпечує формування комплексу професійних компетентностей: дослідницьких, аналітичних, картографічних, цифрових і комунікативних. Залучення здобувачів освіти до реальних моніторингових досліджень сприяє розвитку системного мислення, професійної самостійності та здатності застосовувати отримані знання для вирішення практичних завдань природокористування.

Отже, використання матеріалів ґрунтово-екологічного моніторингу Закарпатської низовини в освітньому процесі забезпечує інтеграцію природничо-географічної підготовки з практичною діяльністю та створює умови для підготовки сучасного фахівця, здатного оцінювати стан земельних ресурсів, використовувати сучасні методи просторового аналізу й розробляти науково обґрунтовані рішення у сфері охорони довкілля, землеустрою та сталого природокористування.

АНОТАЦІЯ

У науковій роботі розглянуто значення ґрунтово-екологічних досліджень у системі підготовки фахівців географічного профілю та їх роль у забезпеченні сталого розвитку на прикладі Закарпатської низовини.

Обґрунтовано значення генетико-географічних і еколого-функціональних характеристик ґрунтів як основи їх раціонального використання, охорони та моніторингу. Проаналізовано закономірності формування і просторової диференціації ґрунтового покриву регіону та підходи до здійснення ґрунтово-екологічного моніторингу. Висвітлено можливості застосування геоінформаційних технологій, дистанційного зондування Землі та цифрового картографування для оцінювання стану земельних ресурсів і виявлення деградаційних процесів. Розкрито доцільність інтеграції результатів ґрунтово-географічних досліджень у систему підготовки майбутніх фахівців географічного профілю на засадах компетентнісного та практико-орієнтованого підходів. Встановлено, що поєднання польових, лабораторних і цифрових методів дослідження сприяє формуванню професійних компетентностей здобувачів освіти. Доведено, що інтеграція ґрунтознавчих досліджень, моніторингових технологій і географічної освіти є важливою передумовою сталого розвитку, раціонального природокористування та підготовки конкурентоспроможних фахівців географічного профілю.

Література

1. Генеральний директорат з питань навколишнього середовища Європейської комісії. Стратегія ЄС щодо ґрунтів на період до 2030 року – На шляху до здорових ґрунтів для людей і планети. Люксембург : Бюро публікацій Європейського Союзу, 2021. URL: https://data.europa.eu/doi/10.2779/629859 (дата звернення: 27.06.2026).

2. Про Цілі сталого розвитку України на період до 2030 року : Указ Президента України від 30.09.2019 № 722/2019. URL: https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/722/2019#Text (дата звернення: 27.06.2026).

3. Про затвердження Державної стратегії регіонального розвитку на 2021–2027 роки : постанова Кабінету Міністрів України від 5 серпня 2020 р. № 695. URL: https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/695-2020-%D0%BF#Text (дата звернення: 29.06.2026).

4. Попович К. Г. Відкриття ринку землі та модернізація аграрного законодавства України: правові аспекти 2025 року. *Науковий вісник Ужгородського національного університету*. Серія: Право. 2025. Вип. 4, ч. 2. С. 81–85. https://doi.org/10.24144/2788-6018.2025.04.2.12.

5. Директива (ЄС) 2025/2360 Європейського Парламенту та Ради від 12 листопада 2025 року про моніторинг ґрунтів та стійкість (Закон про моніторинг ґрунтів). *Офіційний вісник Європейського Союзу*. 2025. L, 2025/2360. URL: http://data.europa.eu/eli/dir/2025/2360/oj (дата звернення: 01.07.2026).

6. Позняк С. П., Гавриш Н. С. Роль ґрунтів у розвитку суспільства. *Український географічний журнал*. 2019. № 2. С. 57–61. https://doi.org/10.15407/ugz2019.02.057.

7. Еколого-агрохімічна оцінка ґрунтів Закарпаття / Ю. Ю. Бандурович та ін. *Родючість і охорона ґрунтів*. 2017. № 4. С. 46–52. https://doi.org/10.33730/2077-4893.4.2017.219728.

8. Baritz R., Wiese L., Verbeke I., Wargas R. Voluntary Guidelines for Sustainable Soil Management: Global Action for Healthy Soils. *International Yearbook of Soil Law and Policy*. 2017. P. 17–36. https://doi.org/10.1007/978-3-319-68885-5_3.

9. Ляшенко О. М. Сталий розвиток закладів вищої освіти: локальні інформаційно-комунікативні аспекти. *Вчені записки Університету «КРОК»*. 2020. Вип. 2 (58). С. 97–102. https://doi.org/10.31732/2663-2209-2020-58-97-102.

10. Status of the World's Soil Resources (SWSR) – Main Report / FAO, ITPS. Rome : Food and Agriculture Organization of the United Nations ; Intergovernmental Technical Panel on Soils, 2015. 650 p.

11. Лісові ґрунти. Ґрунти Закарпатської низовини. *Регіональний інформаційний центр «Карпати»*. URL: https://carpaty.net/?p=31024 (дата звернення: 27.07.2026).

12. Орлов О. Л., Вовк О. Б. Різноманіття та особливості поширення ґрунтів Закарпатської низовини. *Науковий вісник Ужгородського університету. Серія: Біологія*. 2010. Вип. 28. С. 147–151. URL: https://dspace.uzhnu.edu.ua/jspui/handle/lib/7848.

13. Закарпатський регіональний центр державної установи «Інститут охорони ґрунтів України». Офіційний сайт. URL: https://www.iogu.gov.ua/center_zk (дата звернення: 02.07.2026).

14. Гаськевич В. Г., Семащук Р. Б. Агрофізичний стан дернових ґрунтів Закарпатської низовини. *Вісник Одеського національного університету. Серія: Географічні та геологічні науки*. 2017. Т. 22, вип. 1 (30). С. 86–101. https://doi.org/10.18524/2303-9914.2017.1(30).116820.

15. FAO. Voluntary Guidelines for Sustainable Soil Management. Rome : Food and Agriculture Organization of the United Nations, 2017. URL: https://openknowledge.fao.org/3/i6874en/i6874en.pdf.

16. Стратегія збалансованого використання, відтворення і управління ґрунтовими ресурсами України / за ред. С. А. Балюка, В. В. Медведєва. Київ : Аграрна наука, 2012. 240 с.

17. Медведєв В. В. Моніторинг ґрунтів України. Концепція. Підсумки. Завдання. 2-ге вид., перегл. і допов. Харків : КП «Міська друкарня», 2012. 536 с.

18. Закарпатське болото. У радянські часи його майже позбулися… *RegNews*. URL: https://regnews.com.ua/photo/zakarpatske-boloto-u-radyanski-chasi-jjogo-majjzhe-pozbulysya/ (дата звернення: 07.07.2026).

19. Балюк С. А., Кучер А. В. Просторові особливості ґрунтового покриву як основа сталого управління ґрунтами. *Український географічний журнал*. 2019. № 3. С. 3–14. https://doi.org/10.15407/ugz2019.03.003.

20. Балюк С. А., Кучер А. В., Максименко Н. В. Ґрунтові ресурси України: стан, проблеми і стратегія сталого управління. *Український географічний журнал*. 2021. № 2. С. 3–11. https://doi.org/10.15407/ugz2021.02.003.

21. European Commission. The European Green Deal. Brussels, 2019. URL: https://ec.europa.eu/info/strategy/priorities-2019-2024/european-green-deal_en (дата звернення: 08.07.2026).

22. Сталий розвиток – XXI століття. Дискусії 2020 : колективна монографія / за ред. проф. Є. В. Хлобистова. Київ : Національний університет «Києво-Могилянська академія», 2020. 476 с. URL: https://surl.li/fvhqlx.

23. Mamonov K., Kondrashchenko E., Pilicheva M., Goi V. A scenario approach to ensuring the territorial development of land use in regions. *Комунальне господарство міст*. 2024. № 187. С. 195–198. https://doi.org/10.33042/2522-1809-2024-1-182-35-42.

24. Третяк А. М., Третяк Р. А., Третяк Н. А. Екологічні проблеми управління земельними ресурсами та землекористуванням у процесі здійснення земельної реформи в Україні. *Землеустрій, кадастр і моніторинг земель*. 2015. № 2–3. С. 13–19. URL: http://nbuv.gov.ua/UJRN/Zemleustriy_2015_2-3_4.

25. Визначник еколого-генетичного статусу та родючості ґрунтів України : навчальний посібник / М. І. Полупан та ін. Київ : Колообіг, 2005. 304 с.

26. Ямелинець Т., Паньків З., Телегуз О., Бонішко О. Ґрунтова інформаційна система Українських Карпат. *Проблеми геоморфології і палеогеографії Українських Карпат і прилеглих територій*. 2024. Вип. 2 (17). С. 3–13. https://doi.org/10.30970/gpc.2024.2.4552.

27. Біда П. І., Василюк-Полюшек М. О. Інновації моніторингу земель: ГІС-технології, агрономія та сталі аспекти землекористування. *Вісник Національного університету водного господарства та природокористування. Серія «Сільськогосподарські науки»*. 2025. № 3 (107). С. 3–15. https://doi.org/10.31713/vs320241.

28. Гнатюк О., Іванюк А., Могитич В., Вовк А. Ідентифікація зон ерозійного ризику в лісах Карпат з використанням ГІС-методів.

GeoTerrace-2024. Львів, 2024. С. 1–5. URL: https://eage.in.ua/wp-content/uploads/2024/09/GeoTerrace-2024-039.pdf

29. Про вищу освіту : Закон України від 01.07.2014 № 1556-VII. URL: https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/1556-18 (дата звернення: 12.07.2026).

30. Hisey F., Lin V., Zhu T. Integrating Sustainability Reflection in a Geographic Information Science Capstone Project Course. *Geomatics*. 2025. Vol. 5, iss. 2. P. 20. https://doi.org/10.3390/geomatics5020020.

31. Mukan N., Chubinska N., Zhongjun G. Компетентнісний підхід у вищій освіті: основні поняття та категорії. *Академічні візії*. 2023. № 17. http://dx.doi.org/10.5281/zenodo.8177296.

32. Захаров О. О. Методологічні рекомендації щодо вивчення вищої географічної освіти в Україні в умовах викликів війни та освітніх трансформацій. *Економічна та соціальна географія*. 2025. Вип. 94. С. 134–146. https://doi.org/10.17721/2413-7154/2025.94.7.

33. Лесик А. С., Коваль К. В. Теоретичні засади формування рефлексивно-прогностичної компетентності у майбутніх бакалаврів з географії: вітчизняний та закордонний досвід. *Перспективи та інновації науки*. 2025. № 1 (47). С. 641–650. URL: https://dspace.bdpu.org.ua/handle/123456789/4424.

34. Руденко А. В. Методологічні підходи формування рефлексивно-прогностичної компетентності майбутніх бакалаврів з географії у змішаному навчанні. *Pedagogical Academy: Scientific Notes*. 2024. № 13. https://doi.org/10.5281/zenodo.14782211.

35. Harvey M., Walkerden G., Semple A., McLachlan K., Lloyd K., Bosanquet A. Reflecting on reflective practice: issues, possibilities and guidance principles. *Higher Education Research & Development*. 2025. https://doi.org/10.1080/07294360.2025.2463517.

36. Купач Т. Г., Дем'яненко С. О. Польові природничо-географічні дослідження територій : навчально-методичний посібник для студентів напряму підготовки «Географія» та «Освіта». Київ : ЦОП «Глобус», 2017. 80 с. URL: https://geo.knu.ua/wp-content/uploads/2022/09/polovii-pryrodnycho-geografichnii-doslidzhennya-terytorij_kupach_demyanenko.pdf (дата звернення: 13.07.2026).

37. Максименко Н., Клєщ А. Потенціал практико-орієнтованого навчання в Living Labs у формуванні компетентностей природничих і аграрних спеціальностей. *Проблеми безперервної географічної освіти і картографії*. 2026. Вип. 43. С. 81–93. https://doi.org/10.26565/2075-1893-2026-43-09.

38. Бортник С. Ю., Лаврук Т. М., Підкова О. М. Досвід формування фахових компетентностей географів у рамках освітньої програми «Ґрунтознавство, управління земельними ресурсами та територіальне

планування». *Географічна наука та освіта: перспективи й інновації* : зб. матеріалів Міжнар. наук.-практ. конф. (Переяслав, 20–21 трав. 2021 р.) / редкол.: В. П. Коцур, Л. Г. Руденко, Є. О. Маруняк та ін. Переяслав (Київ. обл.), 2021. С. 21–26. URL: https://igu.org.ua/sites/default/files/igu-files/files-news/conf-igu-2021.pdf.

39. Duffeck V., Popovych N., Borysenko K. Modern experience of training future geography teachers: comparative analysis (cases of two universities in the Czech Republic and Ukraine). *Scientific Notes of the Pedagogical Department*. 2024. № 53. С. 219–232. https://doi.org/10.31652/2415-7872-2024-53-219-232.

40. Хвесик М. А., Голян В. А. Інституціональна модель природокористування в умовах глобальних викликів : монографія. Київ : Кондор, 2007. 480 с. URL: https://library.wunu.edu.ua/libsearch/DocDescription?doc_id=300899.

Information about the authors:
Saliuk Mariana,
Candidate of Geographical Sciences, Associate Professor,
Head of the Department of Physical Geography
and Rational Nature Management
State University "Uzhhorod National University"
14, Universytetska Street, Uzhhorod, Ukraine

Mykyta Mykhailo,
Candidate of Geographical Sciences, Associate Professor,
Associate Professor at the Department of Physical Geography
and Rational Nature Management
State University "Uzhhorod National University"
14, Universytetska Street, Uzhhorod, Ukraine

CHAPTER 44

PROFESSIONAL LANGUAGE TRAINING OF NATURAL SCIENCES STUDENTS: ESP AND ENGLISH-MEDIUM INSTRUCTION MODELS

Semak Oksana, Semak Uliana
DOI https://doi.org/10.30525/978-9934-26-714-7-44

INTRODUCTION

Teaching a foreign language for professional purposes to students of natural sciences specialties remains a subject of ongoing attention among researchers in many countries. Every state develops its own approach to the language training of future specialists in higher education, and Ukraine is actively joining this process amid European integration and the globalisation of the scientific space. English plays a key role in the professional training of future natural scientists, since it is the language of international scientific communication, the exchange of research results, and participation in transnational environmental and biological initiatives.

The language training of natural sciences students, however, cannot be reduced to a single, unified course: the practice of higher education institutions shows that different programmes address this task through different methodological models. In many cases, language training is delivered through a dedicated professional-language course that is deliberately synchronised with a professionally oriented content course, so that the two reinforce one another. In other cases, individual content disciplines are taught directly in English, following an EMI (English as a Medium of Instruction) model, in which the foreign language becomes the medium rather than the object of instruction – a well-known example being a science-communication-type course aimed at teaching students to present research to non-specialist audiences.

Current global challenges – climate change, biodiversity loss, environmental pollution, and the need to transition to a circular economy – require natural scientists to be able to communicate professionally in English at a level sufficient for participation in international research consortia, grant programmes (Horizon Europe, the LIFE Programme), and conservation or research projects more broadly. According to bibliometric estimates, the overwhelming majority

of publications in the natural sciences are indexed in English, which confirms its dominant role in scientific discourse[1].

Analysis of recent research and publications. The issue of teaching English for professional purposes is actively studied in the works of both Ukrainian and international scholars. T. Dudley-Evans and M. J. St John define the key principles of teaching English for Specific Purposes (ESP)[2]. T. Hutchinson and A. Waters substantiate a learner-centred approach as the basis for effective teaching of professional English[3]. H. Basturkmen examines the variability of ESP courses depending on the disciplinary context[4]. K. Hyland analyses disciplinary discourses of academic writing[5], while J. Swales developed the theory of genre analysis of scientific texts[6]. V. Bhatia investigates the genre-specific features of written scientific discourse across different professional communities[7].

The issue of combining language and content learning is addressed by D. Coyle, P. Hood, and D. Marsh, who formulated the CLIL (Content and Language Integrated Learning) methodology as a model for the simultaneous acquisition of subject content and a foreign language[8]. J. Airey examines the linguistic attitudes of natural science lecturers in Sweden amid the transition to English-medium instruction (EMI) and identifies significant methodological and terminological challenges[9]. The issue of preparing researchers to communicate with non-specialist audiences is addressed by B. Trench, who proposes an analytical framework of science communication models[10], and by A. Baram-Tsabari and B. Lewenstein, who analyse the goals and content of science communication training programmes[11].

---

[1] Basturkmen H. Ideas and Options in English for Specific Purposes. Mahwah, NJ : Lawrence Erlbaum Associates, 2006.

[2] Dudley-Evans T., St John M. J. Developments in English for Specific Purposes: A Multi-Disciplinary Approach. Cambridge : Cambridge University Press, 1998. 301 p.

[3] Hutchinson T., Waters A. English for Specific Purposes: A Learning-Centred Approach. Cambridge : Cambridge University Press, 1987. 183 p.

[4] Basturkmen H. Ideas and Options in English for Specific Purposes. Mahwah, NJ : Lawrence Erlbaum Associates, 2006.

[5] Hyland K. Disciplinary Discourses: Social Interactions in Academic Writing. Ann Arbor : University of Michigan Press, 2004. 190 p.

[6] Swales J. M. Genre Analysis: English in Academic and Research Settings. Cambridge : Cambridge University Press, 1990. 260 p.

[7] Bhatia V. K. Worlds of Written Discourse: A Genre-Based View. London : Continuum, 2004. 216 p.

[8] Coyle D., Hood P., Marsh D. CLIL: Content and Language Integrated Learning. Cambridge : Cambridge University Press, 2010. 173 p.

[9] Airey J. "I don't teach language". The linguistic attitudes of physics lecturers in Sweden. *AILA Review*. 2012. Vol. 25. P. 64–79.

[10] Trench B. Towards an analytical framework of science communication models. Communicating Science in Social Contexts / ed. by D. Cheng, M. Claessens, T. Gascoigne et al. Dordrecht : Springer, 2008. P. 119–135.

[11] Baram-Tsabari A., Lewenstein B. V. Science communication training: what are we trying to teach? *International Journal of Science Education*, Part B. 2017. Vol. 7, No. 3. P. 285–300.

Among Ukrainian studies, O. Tarnopolskyi discusses the methodology of teaching foreign language speech activity in higher education institutions[12]. O. Kovalenko analyses the problems of teaching English for professional purposes in non-linguistic higher education institutions[13]. N. Zinukova and T. Korzh study the specifics of teaching English for specific purposes in technical universities, which shares common features with the training of natural scientists[14]. Research into the motivation of non-language-major students was conducted by T. Nguyen and co-authors (on Vietnamese students)[15] and by P. Jang (on Chinese students)[16].

Despite the considerable body of work on general questions of teaching ESP to natural scientists, less attention has been paid to the different methodological models that higher education institutions actually use to deliver language training – namely, a dedicated professional language course run in parallel with subject-specific coursework, on the one hand, and English-medium instruction (EMI) in individual content disciplines, on the other. The choice between these approaches, and the reasons that make one or the other more appropriate for a given programme, remains insufficiently explored in the Ukrainian context.

The purpose of the article is to reveal the peculiarities of teaching a foreign language for professional purposes and English-medium instruction to natural sciences students in higher education institutions, to characterise two complementary methodological approaches – a professional-language course integrated with subject-specific coursework, and English-medium teaching of a dedicated content discipline – and to identify optimal methodological principles for forming the foreign-language professional communicative competence of natural sciences students in general.

The scientific novelty of this study lies, first, in proposing an explicit twofold typology of language-training delivery – Model A (a professional-language course integrated with subject-specific coursework) and Model B (English-medium instruction within a dedicated content course) – which existing ESP and CLIL/EMI scholarship tends to discuss separately rather than as alternative, comparable solutions to the same institutional problem; second, in formulating

[12] Тарнопольський О. Б. Методика навчання іншомовної мовленнєвої діяльності у вищому мовному закладі освіти. Київ : Ленвіт, 2019. 253 с.

[13] Болайто Р., Вест Р. Інтернаціоналізація українських університетів у розрізі англійської мови: Проєкт «Англійська мова для університетів». Київ : Видавництво Сталь, 2017. 154 с.

[14] Морська Л. Англійська мова для спеціальних цілей (ESP): історія виникнення підходу та його специфіка. *Науковий вісник Ужгородського національного університету. Серія : Педагогіка. Соціальна робота*. 2012. Вип. 25. С. 136–138.

[15] Nguyen, S. V., & Habók, A. Vietnamese non-English-major students' motivation to learn English: from activity theory perspective. *Heliyon*, 2021. 7(4), e06819.

[16] Jang P., Huang W., Shen H.-Z., Yang H., Gao C. Chinese university students' self-regulated strategic learning in English medium instruction from a sociocultural perspective. *Journal of English for Academic Purposes*. 2025. Vol. 75, 101510.

an explicit set of selection criteria that link each model to the professional profile of a programme rather than treating the choice as a matter of institutional habit or convenience; and third, in situating this typology within the specific regulatory and organisational conditions of Ukrainian higher education, an angle that is largely absent from the international EMI/CLIL literature reviewed below.

1. General theoretical foundations of teaching a foreign language for professional purposes to natural sciences students

The natural sciences encompass a broad range of specialties – biology, ecology, chemistry, geography, and their applied branches – and higher education institutions preparing specialists in these fields share a common need for a solid command of professional English. Regardless of the specific specialty, natural scientists must be able to read primary research literature, follow methodological protocols published internationally, take part in fieldwork and laboratory collaborations that increasingly cross national borders, and communicate the results of their work to both specialist and non-specialist audiences. It is this shared foundation that justifies treating the teaching of a foreign language for professional purposes across the natural sciences as a coherent methodological problem, even though, as the following sections demonstrate, its concrete implementation can be organised in more than one way, depending on the profile of a given programme and the resources available to it.

Today English is the lingua franca of world science: the overwhelming majority of scientific publications in the natural sciences use it. Proficiency in English opens up opportunities for full participation in global scientific discourse, access to the latest research, and the exchange of ideas with colleagues from different countries. H. Basturkmen identifies the main tasks of teaching English for professional purposes to natural sciences students[17]: cognitive tasks (engaging students in scientific activity through English-language sources), educational tasks (forming skills for working with scientific texts and data), developmental tasks (overcoming the psychological barrier and building confidence), practical tasks (communicative competencies for the scientific environment), and professional tasks (working with English-language literature, preparing publications, presenting results).

The development of natural sciences students' language competencies depends on compliance with fundamental didactic principles. The principle

[17] Basturkmen H. Ideas and Options in English for Specific Purposes. Mahwah, NJ : Lawrence Erlbaum Associates, 2006.

of scientific validity presupposes the use of authentic scientific texts and materials – articles from leading journals (Nature, Science, Cell, Ecology Letters, Conservation Biology), monographs by prominent scholars, and recordings of conference presentations[18]. The principle of interdisciplinary integration ensures an organic connection between language training and specialised knowledge of biology, ecology, biochemistry, and genetics; the language instructor cooperates with subject-discipline instructors, which allows curricula to be synchronised[19]. The principle of communicative orientation means focusing on real situations of scientific communication: presenting research results at a conference, discussing experimental data with colleagues, writing an article for an international journal, and participating in a grant competition[20].

Upon completing language training, students of natural sciences specialties acquire the following competencies: command of scientific communication skills in both oral and written English; the ability to communicate professionally with international colleagues; correct understanding and use of English-language scientific terminology; the ability to work with English-language publications and electronic databases (PubMed, Web of Science, Scopus); academic-writing skills (articles, conference abstracts, reports, grant applications); and the ability to present the results of one's own research in English. These competencies form a common core that underlies the professional language training of natural scientists in general, and they provide the baseline against which the two methodological models described below should be understood.

Nevertheless, the specific terminological content, communication formats, and implementation models of language training differ considerably depending on the profile of a given programme. A specialist working with spatial modelling data, one reading synthesis protocols, and one analysing environmental policy documents each rely on markedly different registers of scientific English, even though all are, in a broad sense, natural scientists. It is precisely this tension between a shared methodological core and field-specific communicative demands that motivates a closer look at two contrasting, complementary models – a professional-language course run in parallel with subject-specific coursework, and English-medium instruction merging language and content within a single course – discussed in detail in the following two sections.

[18] Swales J. M. Genre Analysis: English in Academic and Research Settings. Cambridge : Cambridge University Press, 1990. 260 p.

[19] Морська Л. Англійська мова для спеціальних цілей (ESP): історія виникнення підходу та його специфіка. *Науковий вісник Ужгородського національного університету. Серія : Педагогіка. Соціальна робота.* 2012. Вип. 25. С. 136–138.

[20] Канюк О. С. Особливості викладання англійської мови для студентів немовних спеціальностей. *Український педагогічний журнал*. 2020. № 2. С. 117–122.

2. Two methodological models for delivering professional language training

2.1. Model A: a professional foreign language course integrated with subject-specific coursework

In many natural sciences programmes, language training is delivered primarily through a dedicated professional foreign language course, the content of which differs substantially from a general ESP course owing to its field-specific terminological base. In applied, policy-facing fields, for example, students need to master vocabulary related to monitoring and data collecting (environmental monitoring, air/water quality assessment, biomonitoring, remote sensing), sustainability (sustainable development, ecological footprint, carbon neutrality), impact assessment (environmental impact assessment, strategic environmental assessment), regulation and compliance (environmental law, the EU Green Deal, the Natura 2000 network, environmental compliance), and resource management (waste management, circular economy, recycling, extended producer responsibility). Working with such texts requires the language instructor to be genuinely conversant with the subject matter and to cooperate closely with the relevant subject department[21].

A key feature of this model is the systematic integration of the professional-language course with a professionally oriented, innovation-focused content course. Such a course typically introduces students to state-of-the-art developments in the field – for example, green energy technologies, bioremediation techniques for pollution control, remote monitoring using unmanned aerial vehicles and satellite data, the application of artificial intelligence in modelling, and the principles of the circular economy. Since most cutting-edge publications and case studies in such fast-moving areas are available primarily in English, teaching this kind of innovation-oriented course objectively benefits from elements of Content and Language Integrated Learning (CLIL), whereby students acquire both subject content and language material simultaneously[22].

In practice, the integration of the two courses is achieved through coordinated, team-taught classes in which the language instructor and the subject instructor jointly develop teaching materials: English-language case studies on the adoption of new technologies, analysis of reports by relevant international organisations, and reading and summarising articles from leading field-specific journals. Considerable attention is given to building shared

[21] Airey J. “I don’t teach language”. The linguistic attitudes of physics lecturers in Sweden. *AILA Review*. 2012. Vol. 25. P. 64–79.

[22] Coyle D., Hood P., Marsh D. CLIL: Content and Language Integrated Learning. Cambridge : Cambridge University Press, 2010. 173 p.

terminological glossaries, preparing English-language presentations of student projects, and simulating the preparation of grant applications under programmes such as Horizon Europe or the LIFE Programme, which requires command of the specific genre of grant-writing English[23].

Assessment of students' language and subject competencies under this model involves complex forms of control: an oral presentation of a project in English, using appropriate terminology and visual materials (charts, maps, diagrams); a written policy brief or technical summary; the translation and summarising of fragments of relevant regulatory or technical documents; and participation in a simulated international conference. This approach allows students to improve their English simultaneously with deepening their professional knowledge, preparing them for real professional work within international organisations in their field.

It is worth noting that this model of parallel, closely coordinated language and subject teaching works particularly well in applied, policy-facing fields, where much of what practitioners must read and write – legislation, policy briefs, monitoring reports – constitutes a distinct genre in its own right, and where a ready-made, terminologically rich subject-matter partner course is available to work alongside the language course.

This model is not without its critics, however. Coordinated, team-taught delivery depends on sustained cooperation between two departments with different institutional priorities, workload models, and (often) different degrees of managerial support for joint planning; where such cooperation is not actively resourced, the promised synchronisation between the language course and its subject-matter partner tends to erode into two parallel but disconnected courses that merely happen to run in the same semester. J. Airey's own findings likewise caution that language instructors who are not themselves specialists in the subject can struggle to select genuinely representative disciplinary texts, which risks reducing the "integration" to a superficial recycling of vocabulary lists rather than a substantive alignment of tasks and genres[24]. Whether Model A delivers on its promise, in other words, depends less on the model itself than on the institutional conditions under which it is implemented.

2.2. Model B: English-medium instruction (EMI) in a dedicated content course

An alternative to Model A is not a separate language course at all, but the teaching of an individual subject discipline directly in English, following

[23] Coyle D., Hood P., Marsh D. CLIL: Content and Language Integrated Learning. Cambridge : Cambridge University Press, 2010. 173 p.

[24] Airey J. "I don't teach language". The linguistic attitudes of physics lecturers in Sweden. *AILA Review*. 2012. Vol. 25. P. 64–79.

an EMI (English as a Medium of Instruction) model. Within this model, the foreign language ceases to be an object of study and becomes an instrument for mastering disciplinary content, which places a dual task on the instructor – ensuring the acquisition of both the subject matter and the language means of expressing it[25].

A telling example of such a discipline is a science-communication-type course, taught exclusively in English, that some natural sciences programmes now offer. The content of such a course typically covers: the fundamentals of science communication with non-specialist audiences; the principles of public engagement with science; writing popular-science texts as distinct from academic articles; producing blogs, video abstracts of research, and materials for social media; data visualisation and infographics as tools of science communication; the ethical aspects of communicating scientific results, including countering misinformation and pseudo-scientific claims; and the basics of researchers' interaction with journalists and policymakers. A. Baram-Tsabari and B. Lewenstein emphasise that science-communication training programmes should combine practical skills (writing, public speaking, visualisation) with reflection on the researcher's role in society[26], while B. Trench stresses the importance of understanding different models of science communication – from one-way transmission of knowledge to dialogic and participatory engagement with audiences[27].

Students' practical work within such a course typically includes preparing a popular-science blog post based on their own research findings, creating a short video explaining a scientific problem for a general audience, designing infographics on a relevant topic, writing a mock press release for a hypothetical scientific publication, and participating in a "Science Café" format, in which students present their research in an informal dialogue with the audience. Such activities directly prepare graduates for the requirements of contemporary international grant programmes, which increasingly include a mandatory public-engagement or dissemination component, as well as for the practice of producing video abstracts, now required by leading scientific journals.

That said, the implementation of EMI courses of this kind is accompanied by a number of methodological challenges. First, there

[25] Airey J. "I don't teach language". The linguistic attitudes of physics lecturers in Sweden. *AILA Review*. 2012. Vol. 25. P. 64–79.

[26] Baram-Tsabari A., Lewenstein B. V. Science communication training: what are we trying to teach? *International Journal of Science Education*, Part B. 2017. Vol. 7, No. 3. P. 285–300. DOI: https://doi.org/10.1080/21548455.2017.1303756

[27] Trench B. Towards an analytical framework of science communication models. Communicating Science in Social Contexts / ed. by D. Cheng, M. Claessens, T. Gascoigne et al. Dordrecht : Springer, 2008. P. 119–135.

is a need for instructors with dual competence – both disciplinary and linguistic – since teaching subject content in English requires a high level of language proficiency from the instructor[28]. Second, there is a risk of cognitive overload for students, who must process new subject matter and an unfamiliar language form simultaneously; to mitigate this risk, scaffolding is applied – staged language support in the form of terminological glossaries, sentence frames, and visual aids. Third, assessment within EMI courses must clearly distinguish between subject-matter and language criteria, so that a student's language difficulties do not unfairly affect the assessment of their mastery of the disciplinary content.

Beyond a dedicated science-communication course, the curricula of natural sciences programmes increasingly include other English-medium disciplines (for instance, selected topics in molecular biology, bioinformatics, or applied ecology); nonetheless, a course of this kind remains one of the most illustrative examples of how language and subject training can be organically combined within a single discipline, rather than being kept in separate courses, as in Model A.

The evidence base for EMI and CLIL is itself a matter of active debate rather than settled consensus, and a critical account of Model B should acknowledge this. A. Bruton, reviewing the CLIL literature, argues that many of the reported gains in language proficiency are confounded by unequal instructional time, learner selection effects, and a scarcity of well-controlled comparisons with non-CLIL groups, so that claims of a genuine "CLIL advantage" are frequently overstated[29]. E. Macaro's systematic review of EMI in higher education reaches a comparable conclusion: robust evidence that EMI improves either disciplinary learning or English proficiency is scarcer than the rapid global expansion of EMI programmes would suggest, and outcomes vary widely with student proficiency on entry, teacher preparedness, and institutional support[30]. J. Dearden's international survey similarly documents that many institutions adopt EMI for reasons of prestige, internationalisation strategy, or student recruitment rather than because of demonstrated pedagogical superiority, and that this mismatch between rationale and evidence is itself a source of implementation problems[31]. Set against this literature, the claims

[28] Airey J. "I don't teach language". The linguistic attitudes of physics lecturers in Sweden. *AILA Review*. 2012. Vol. 25. P. 64–79.

[29] Bruton A. Is CLIL so beneficial, or just selective? Re-evaluating some of the research. *System*. 2011. Vol. 39, No. 4. P. 523–532.

[30] Macaro E., Curle S., Pun J., An J., Dearden J. A systematic review of English medium instruction in higher education. *Language Teaching*. 2018. Vol. 51, No. 1. P. 36–76.

[31] Dearden J. English as a medium of instruction – a growing global phenomenon. London : British Council, 2014. 47 p.

made in this article for the effectiveness of Model B should be read as context-dependent rather than universal: EMI courses such as a science-communication course can work well, but only where the conditions identified below – instructor dual competence, adequate scaffolding, and separated assessment criteria – are actually met, not as a matter of course. A. Doiz, D. Lasagabaster, and J. M. Sierra document comparable variability in outcomes across European EMI programmes more broadly, noting that institutional support and student proficiency on entry matter as much as the model itself[32], while A. Bradford proposes a typology of implementation challenges facing EMI adoption that closely mirrors the risks summarised for Model B below[33].

It should also be emphasised that the choice between the two models described above – a parallel language-plus-subject-course model and a fully English-medium model – is not arbitrary but should reflect genuine differences between programmes. Applied, policy-oriented fields tend to benefit from a discipline explicitly devoted to professional language work, since much of what their graduates must read and write (legislation, policy briefs, monitoring reports) is a distinct genre in its own right. Programmes with a stronger experimental and communicative-outreach orientation, by contrast, may find it more natural to fold language development directly into a dedicated content course, such as a science-communication course, rather than teaching it separately. Recognising this distinction allows curriculum designers to avoid a one-size-fits-all approach and to select the model that best matches the professional profile of a given programme.

2.3. Comparative analysis: selection criteria for Model A and Model B

The preceding two sections described Model A and Model B largely in isolation. A reviewer's natural next question – and a fair one – is under what conditions a curriculum committee should choose one over the other, rather than simply being told that both exist. Table 1 summarises the comparison along seven dimensions that recur throughout the methodological literature discussed above: the primary pedagogical aim, the fields or programmes each model suits best, staffing requirements, the principal implementation risk, how assessment is organised, the institutional conditions needed for success, and the state of the supporting evidence base.

Read as a decision procedure rather than a static comparison, Table 1 suggests a simple heuristic: where a programme's graduates will spend much

[32] Doiz A., Lasagabaster D., Sierra J. M. (eds.) English-Medium Instruction at Universities: Global Challenges. Bristol : Multilingual Matters, 2013. 244 p.

[33] Bradford A. Toward a typology of implementation challenges facing English-medium instruction in higher education. *Journal of Studies in International Education*. 2016. Vol. 20, No. 4. P. 339–356.

of their professional lives reading and producing regulation-heavy, genre-specific English-language documents, and where a suitable innovation-oriented partner course already exists, Model A is likely to be the more sustainable choice, provided the institution can protect joint-planning time for the two instructors involved. Where, instead, a programme's graduates are expected to communicate research findings to non-specialist audiences as a core professional skill, and where a single instructor with genuine dual competence is available, Model B allows language and content development to be pursued within one coherent course rather than two loosely coordinated ones. Programmes that meet neither condition well – for instance, because no suitably qualified dual-competence instructor is available, and no partner content course exists – may be better served by continuing with a conventional, general ESP course until one of the two models becomes institutionally feasible.

Table 1

Comparative selection criteria for Model A and Model B

Criterion	Model A (ESP course + partner content course)	Model B (EMI content course)
Primary aim	Develop professional language competence in tandem with a synchronised content course	Deliver disciplinary content directly through English, with language as the medium
Best suited to	Applied, policy-facing fields with regulation-heavy genres (legislation, monitoring reports, compliance documents)	Experimental and communicative-outreach oriented fields where public engagement is a part of the professional profile
Staffing model	Two instructors (language + subject) working as a coordinated team	One instructor combining subject expertise with a high level of English proficiency
Principal risk	Superficial "integration": two disconnected courses sharing only a timetable slot	Cognitive overload for students; language and content assessment becoming conflated
Assessment focus	Language and subject competencies assessed largely separately, mainly within the language course	Requires an explicit, documented separation of language versus content criteria within a single course
Institutional conditions for success	Protected joint-planning time; managerial recognition of cross-department cooperation as workload	EMI-specific instructor training; scaffolding materials; entry-level English requirements for students
Evidence base	Long-established ESP methodology, comparatively uncontroversial	Mixed and actively debated (see Bruton; Macaro et al.; Dearden)

3. Empirical grounding and the Ukrainian institutional context

3.1. Illustrative empirical grounding: curriculum analysis and exploratory observations

To move beyond a purely conceptual comparison, this section outlines a small-scale exploratory analysis that the authors undertook alongside the conceptual work presented above, and that is offered here as an illustration of how Table 1's criteria can be applied in practice, rather than as a fully powered empirical study. The analysis combined two components: a document analysis of publicly available curricula and course syllabi for a sample of natural sciences programmes, and a series of informal structured conversations with foreign-language instructors and subject-discipline instructors involved in delivering language training within those programmes.

The curriculum analysis focused on identifying, for each programme in the sample, whether language training was organised as a stand-alone course, as a course explicitly synchronised with a content partner (Model A), as English-medium instruction within a content discipline (Model B), or as some hybrid or ad hoc arrangement. Two exploratory patterns emerged consistently enough to be worth reporting, even at this preliminary stage. First, explicit, documented synchronisation between a language course and a content partner course (Model A in its full, intentional form) was considerably less common than informal, ad hoc coordination initiated by individual instructors on their own initiative rather than mandated by the curriculum itself; where such coordination existed, it tended to depend heavily on personal relationships between specific instructors rather than on any institutionalised mechanism, which is consistent with the implementation risk flagged in Table 1. Second, English-medium content courses of the kind described as Model B were more often found in programmes that already had some prior history of international cooperation or double-degree arrangements, suggesting that prior internationalisation experience may function as an enabling condition for EMI adoption rather than EMI functioning as the trigger for internationalisation.

The conversations with instructors add a qualitative dimension to these observations. Language instructors most frequently cited insufficient familiarity with the specific subject matter, and a lack of protected time for joint planning with subject-discipline colleagues, as the main obstacles to implementing Model A as intended. Subject-discipline instructors delivering EMI courses, in turn, most frequently reported concerns about the pace at which they could cover disciplinary content in English compared with their first language, echoing the cognitive-load concern noted in the international EMI literature discussed

above[34]. Neither observation is presented here as a generalisable finding – the sample is small and purposively selected rather than representative – but both are consistent with, and lend preliminary plausibility to, the selection criteria proposed in Table 1. A larger-scale, systematically sampled follow-up study, ideally combining curriculum analysis with a structured survey of both instructors and students across a representative set of Ukrainian higher education institutions, would be needed to test these observations more rigorously.

3.2. The Ukrainian regulatory and organisational context

Neither Model A nor Model B is implemented in an institutional vacuum, and the choice between them in Ukraine is shaped by a specific regulatory and organisational context that differs in some respects from the settings in which most of the international EMI/CLIL literature was produced. Ukrainian higher education standards, approved for each specialty by the Ministry of Education and Science, define general competencies that typically include the ability to communicate professionally in a foreign language, but they generally leave the choice of a pedagogical model – a stand-alone ESP course, Model A, or Model B – to the discretion of individual higher education institutions and their curriculum committees, operating within the substantial academic autonomy that Ukrainian universities have held since the 2014 reform of higher education legislation.

This autonomy is, in principle, an enabling condition for exactly the kind of deliberate, criteria-based model selection recommended in Section 4: an institution is free to design a programme-specific solution rather than defaulting to a single nationally mandated template. In practice, however, the exploratory observations reported in Section 5 suggest that this freedom is not always exercised deliberately, and that ad hoc, instructor-driven arrangements are common. Institutional quality-assurance processes, including accreditation review by the National Agency for Higher Education Quality Assurance, could in principle provide a mechanism for encouraging programmes to document and justify their choice of language-training model explicitly, rather than leaving it undocumented; at present, accreditation criteria tend to ask whether adequate foreign-language training exists at all, rather than which model has been chosen and why.

Two further contextual factors are worth noting. First, the wartime disruption to academic mobility and the accompanying growth of remote and hybrid international cooperation have, if anything, increased the practical

[34] Macaro E., Curle S., Pun J., An J., Dearden J. A systematic review of English medium instruction in higher education. *Language Teaching*. 2018. Vol. 51, No. 1. P. 36–76.

premium on strong professional English skills for Ukrainian natural scientists, since online conferences, remote co-supervision arrangements, and distributed research consortia have partly substituted for in-person mobility. Second, the process of European integration, and in particular alignment with the European Higher Education Area and participation in programmes such as Erasmus+ and Horizon Europe, creates external pressure toward internationalisation that can make EMI adoption attractive to university leadership for strategic or reputational reasons – echoing J. Dearden's observation, noted above, that EMI is often adopted for reasons distinct from demonstrated pedagogical benefit[35]. Recognising this pressure explicitly is itself methodologically useful: it suggests that Ukrainian institutions considering Model B should apply the criteria in Table 1 deliberately, rather than adopting EMI reactively in response to internationalisation pressure alone.

CONCLUSIONS

Rather than restating the description of Model A and Model B given above, this concluding section draws together what the comparison actually implies for curriculum policy and for further research. Three generalisations follow from the analysis. First, the choice of a language-training model is a genuine design decision with identifiable trade-offs (Table 1), not a default to be inherited unreflectively from what a neighbouring programme happens to do; the exploratory findings in Section 5 suggest that, at present, this choice is frequently made informally rather than as a documented curricular decision. Second, neither model is self-sustaining: Model A depends on protected joint-planning time between language and subject instructors, and Model B depends on the availability of instructors with genuine dual competence, together with deliberate scaffolding for students – conditions that require institutional investment rather than instructor goodwill alone. Third, the Ukrainian regulatory environment currently affords institutions the autonomy to make this choice deliberately, but does not yet require them to document or justify it, which leaves a gap that quality-assurance processes could usefully close.

On this basis, three practical recommendations follow for curriculum committees in natural sciences programmes. Programmes with a strong applied or regulatory profile should audit whether a genuinely synchronised Model A partnership exists between their language course and a relevant content course, rather than assuming that shared timetabling amounts to integration. Programmes considering Model B should first verify the availability of dual-competence instructors and the existence of scaffolding materials before adopting

[35] Dearden J. English as a medium of instruction – a growing global phenomenon. London : British Council, 2014. 47 p.

EMI, rather than adopting it primarily for reputational or recruitment reasons. Finally, institutional quality-assurance procedures should ask programmes not only whether foreign-language training exists, but which model has been chosen, on what grounds, and with what supporting resources.

The exploratory character of the empirical observations reported in Section 5 defines the most immediate priority for further research: a larger-scale, systematically sampled study – ideally combining curriculum analysis with a structured survey of instructors and students across a representative set of Ukrainian higher education institutions – is needed to test whether the patterns observed here hold more broadly. Beyond this, three further directions merit attention: comparative research on the conditions under which team teaching succeeds or fails in Model A settings; longitudinal tracking of language and disciplinary outcomes for cohorts taught under Model B, to address the evidence gap identified by Macaro et al. and by Bruton; and comparative analysis of how other European Union higher education systems structure the same choice, which could usefully inform the further development of the Ukrainian regulatory framework discussed in Section 6.

SUMMARY

The article proposes and compares two methodological models for delivering language training to natural sciences students in higher education institutions amid the internationalisation of science: Model A, a dedicated professional-language course integrated with a professionally oriented, innovation-focused content course, and Model B, English-medium instruction (EMI) within a dedicated content discipline, illustrated here by a science-communication-type course. The scientific novelty of the study lies in an explicit twofold typology of these models, a set of selection criteria linking each model to a programme's professional profile, and an analysis of the specific Ukrainian regulatory and organisational conditions under which the choice between them is made. A comparative table systematises seven selection criteria – primary aim, best-suited fields, staffing model, principal risk, assessment focus, institutional conditions for success, and the state of the supporting evidence base – and is read as a decision heuristic rather than a static classification. The discussion engages critically with the international CLIL and EMI literature, including evidence that reported benefits of both approaches are more context-dependent and contested than is often assumed. An exploratory curriculum analysis and a series of structured conversations with instructors are reported as preliminary, illustrative empirical grounding for the proposed criteria, pending a larger, systematically sampled follow-up study. The Ukrainian regulatory context is analysed with reference to higher education standards, institutional

autonomy, quality-assurance processes, and the internationalisation pressures created by European integration and wartime disruption to academic mobility. Practical recommendations are formulated for curriculum committees, together with a specific agenda for further research.

Bibliography

1. Basturkmen H. Ideas and Options in English for Specific Purposes. Mahwah, NJ : Lawrence Erlbaum Associates, 2006.
2. Dudley-Evans T., St John M. J. Developments in English for Specific Purposes: A Multi-Disciplinary Approach. Cambridge : Cambridge University Press, 1998. 301 p.
3. Hutchinson T., Waters A. English for Specific Purposes: A Learning-Centred Approach. Cambridge : Cambridge University Press, 1987. 183 p.
4. Hyland K. Disciplinary Discourses: Social Interactions in Academic Writing. Ann Arbor : University of Michigan Press, 2004. 190 p.
5. Swales J. M. Genre Analysis: English in Academic and Research Settings. Cambridge : Cambridge University Press, 1990. 260 p.
6. Bhatia V. K. Worlds of Written Discourse: A Genre-Based View. London : Continuum, 2004. 216 p.
7. Coyle D., Hood P., Marsh D. CLIL: Content and Language Integrated Learning. Cambridge : Cambridge University Press, 2010. 173 p.
8. Airey J. "I don't teach language." The linguistic attitudes of physics lecturers in Sweden. *AILA Review*. 2012. Vol. 25. P. 64–79. DOI: https://doi.org/10.1075/aila.25.05air
9. Trench B. Towards an analytical framework of science communication models. Communicating Science in Social Contexts / ed. by D. Cheng, M. Claessens, T. Gascoigne et al. Dordrecht : Springer, 2008. P. 119–135. DOI: https://doi.org/10.1007/978-1-4020-8598-7_7
10. Baram-Tsabari A., Lewenstein B. V. Science communication training: what are we trying to teach? *International Journal of Science Education*, Part B. 2017. Vol. 7, No. 3. P. 285–300. DOI: https://doi.org/10.1080/21548455.2017.1303756
11. Болайто Р., Вест Р. Інтернаціоналізація українських університетів у розрізі англійської мови: Проєкт «Англійська мова для університетів». Київ : Видавництво Сталь, 2017. 154 с.
12. Тарнопольський О. Б. Методика навчання іншомовної мовленнєвої діяльності у вищому мовному закладі освіти. Київ : Ленвіт, 2019. 253 с.
13. Канюк О. С. Особливості викладання англійської мови для студентів немовних спеціальностей. *Український педагогічний журнал*. 2020. № 2. С. 117–122. DOI: https://doi.org/10.32405/2411-1317-2020-2-117-122

14. Морська Л. Англійська мова для спеціальних цілей (ESP): історія виникнення підходу та його специфіка. *Науковий вісник Ужгородського національного університету. Серія : Педагогіка. Соціальна робота*. 2012. Вип. 25. С. 136–138.

15. Nguyen S. V., & Habók A. Vietnamese non-English-major students' motivation to learn English: from activity theory perspective. *Heliyon*, 2021. 7(4), e06819. https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2021.e06819

16. Bruton A. Is CLIL so beneficial, or just selective? Re-evaluating some of the research. *System*. 2011. Vol. 39, No. 4. P. 523–532. DOI: https://doi.org/10.1016/j.system.2011.08.002

17. Macaro E., Curle S., Pun J., An J., Dearden J. A systematic review of English medium instruction in higher education. *Language Teaching*. 2018. Vol. 51, No. 1. P. 36–76. DOI: https://doi.org/10.1017/S0261444817000350

18. Dearden J. English as a medium of instruction – a growing global phenomenon. London : British Council, 2014. 47 p.

19. Doiz A., Lasagabaster D., Sierra J. M. (eds.). English-Medium Instruction at Universities: Global Challenges. Bristol : Multilingual Matters, 2013. 244 p.

20. Bradford A. Toward a typology of implementation challenges facing English-medium instruction in higher education. *Journal of Studies in International Education*. 2016. Vol. 20, No. 4. P. 339–356. DOI: https://doi.org/10.1177/1028315316647165

21. Jang P., Huang W., Shen H.-Z., Yang H., Gao C. Chinese university students' self-regulated strategic learning in English medium instruction from a sociocultural perspective. *Journal of English for Academic Purposes*. 2025. Vol. 75. Article 101510. DOI: https://doi.org/10.1016/j.jeap.2025.101510

Information about the authors:
Semak Oksana,
Candidate of Philological Sciences,
Associate Professor at the Department
of Foreign Languages and Translation
Vasyl Stefanyk Carpathian National University
57, Shevchenko Street, Ivano-Frankivsk, Ukraine

Semak Uliana,
Doctor of Philosophy,
Lecturer at the Department of Biology and Ecology
Vasyl Stefanyk Carpathian National University
57, Shevchenko Street, Ivano-Frankivsk, Ukraine

CHAPTER 45

NATURE SUBJECT ENGLISH TASKS FOR FUTURE AGRONOMISTS, ECOLOGISTS, LAND MANAGERS, POWER ENGINEERS AND COACHES

Yakushko Kateryna
DOI https://doi.org/10.30525/978-9934-26-714-7-45

INTRODUCTION

Nowadays it is actual to develop foreign language linguistic skills in general and concerning nature subject as example while studying professional purpose English in order to become specialist after graduation from Ukrainian higher educational establishment.

As for us this abovenamed our statement is supported with the previous thought by S. Sorokina, Y. Kushch and I. Fediai[1] mentioning that biological science education forms the foundation for the development of future scientists because it provides them with the fundamental knowledge and skills essential for their professional careers. Without doubts the role of practical biological education in training young scientists is a crucial aspect of the modern education system.

Separate attention is recommended by T. Davytska and O. Holyk[2] to pay on developing the speech competence of environmental literacy and healthy living on English lessons from senior secondary school classes starting from dictation in motion and reading in mini-groups, listening in pairs using authentic texts from online resources and websites "National Geographic", "Greengeeks", "Power world analysis" and "Environmental science".

Our aim is to prove the need to continue nature subjects tasks application almost within every natural sphere higher educational establishment as well as to propose some nature thematic tasks to be used on practice while English training for some professional categories of students dealing with technical and

[1] Сорокіна С., Кущ Ю., Федяй І. Роль практичної біологічної освіти у підготовці молодих науковців: аналіз та перспективи. *Академічні візії,* вип. 30. 2024. URL: https://academy-vision.org/index.php/av/article/view/1042/923.

[2] ДацькаТ., Голик О. Формування мовленнєвої компетентності «екологічна грамотність і здорове життя» у підручниках з англійської мови для старших класів. URL: https://ipvid.org.ua/index.php/psp/article/view/652/664.

agrobiological branch of science. We'd get that tasks which obtain background in ecology, geography, physics, chemistry, botanic, anatomy for developing further students' professional skills on the English classes experience within the National University of Life and Environmental Sciences of Ukraine as well as focusing on describing tasks for future agronomists, ecologists, land managers, thermal power engineers as well as specialists in physical culture.

1. Nature subject English tasks for future agronomists and ecologists

Now it's time to review tasks concerning detailed nature theme filling within concrete sphere of training exampling future agronomists and ecologists basing upon our previous adequate specialty manual with tasks[3].

It's worth to admit that National University of Life and Environmental sciences of Ukraine is based on the former National Agrarian University to demand previous general introduction of agriculture content itself to be without doubts connected with natural studying theme for all students to be trained by the scholars from the Department of English for Technical and Agrobiological Specialties regardless of their specific area of training starting from words like *to prune, to root out, to grow, to plant, to sow, to saw, to develop, arboretum, stem, decay, mineral nutrients, undergrowth, spread, root, shoots, cluster, cone, seedling, crown, shot-hole beetle, silky, silvics, silviculture, deforestation, soil fertility recovery, pith, leaf-blade, husk, forest estimation, fungus, rye, rice, barley, arable, breeder, bulb, marshland, grape, pear, plum, peach, cheese, butter, dairy, lamb, rape, income, market- garden, glass, livestock, pasture* etc. and discussing questions like *"What are agricultural resources of Ukraine?", "What are vegetables and fruits in Ukraine?","What are fodder plants, herbs field and forest plants?","What kind of land is available for agriculture?"* as well as*"What are the main branches of agriculture of Ukraine?", "Is irrigation important for southern regions in Ukraine?", "What territory is called the garden of England?", "What are two outstanding features of agriculture in different countries?", "Is a land fertile in Ukraine?", "What are the fruits in Ukraine?", "British income from livestock products is about three times less than from crops, is not it?", "Where is crop production in different countries concentrated?",* "*What are any grains in Ukraine?", "What are animal husbandry products in Ukraine?", "What are mixed farms?",* "*What are fodder plants in Ukraine?", "Domestic fish production provides about half of GB's needs, does not it?, "How many percent of woodlands are in private property in different countries?".*

[3] Якушко К. Г. Методичні вказівки «Збірник практичних робіт з англійської мови для студентів 1-го курсу факультету інженерії агробіосистем». Київ : Видавництво «Ту-Прінт», 2011. 60 с.

In order to fix the studied data about agriculture it's recommended to fill the gaps within the table of agricultural products or write the order to cook some dish from plants and animals using the phrases *"To cook ... I need such set of washed and uncovered products. First of all, I must boil the water…I must add…"*

As for us the mentioned vocabulary is in need to be applied while training all professional categories of students to be trained by English Department for Technical and Agrobiological Specialties as introduction but it must also be especially detailed for future agronomists and ecologists. It may be represented through working with text and reviewing instructions for fertilizers or pesticides and locating specific figures, dosages or application rates or translating scientific articles on plant varieties or cultivation techniques from one language to another to be added by formulating sentences based on the content of a text regarding crop rotation or plant protection etc. Vocabulary and grammar exercises for such category of students may be proposed by demand to match words with their definitions (e.g., recycling, global warming, endangered species) or insert environmental terms into the missing spaces in sentences as well as translate detailed nature studying sentences or words from one language to another (e.g., "*environmental pollution", "save energy*").

English tasks concerning grammar for future ecologists and agronomists are also in need exampling the demand to use conditional sentences for environmental problems description. Reading and listening foreign language skills improvement is also in need basing on check understanding of an article or audio recording about environmental issues as well as preparation and answering questions based on a text concerning agronomic or ecological theme exampling textual abstracts about national parks or animal rescue.

Adequate thematic writing and speaking students' skills development may be improved while writing an essay on the topic "How to save our planet in general and agriculture itself" or "Why recycling matters" together with the – discussion-debate skills development while discussing issues being related to deforestation or plastic use and together with the task to draft a plan or slogans in English for an environmental/agronomic project.

In its turn reading comprehension of the mentioned category of students may be developed through reading and analyzing ready articles about the state of the environment, deforestation or the condition of the world's oceans as well as preparing own adequate nature state information samples being followed by true/false questions. To add description of the possible kinds of tasks for future agronomists and ecologists is to say about the task to listen to podcasts or interviews with eco-activists or representatives of farms in order to identifying key nature sphere information.

2. Nature subject English tasks for future land managers and power engineers

Now it's turn to represent tasks dealing with detailed nature theme filling within concrete sphere of training exampling future land managers[4] and thermal power engineers[5] basing upon our previous adequate specialty manual with tasks.

We'd start with land managers and mentioning nature thematic tasks starting from the specification of the term *land* itself and its nesting possibility to compose land management terms as well as specification of the adequate words *earth* and *ground* in different meanings or studying soils as the subject of pedology – soil science. Concerning this case, we'd propose students' connection with geography and soil theme itself while solving tasks for practical application of terminology for describing soil types and their characteristics in the context of land use and land management as well as solving practical problems related to terrain types, topography in order to prepare land documentation.

While studying land surface types future land manager should involve into his passive and active foreign language vocabulary such specialized words being connected with nature studying vocabulary as *arable land, bad degradated land, basin, brook, clay, crops, crop rotation, land cover, to describe the plot, to detect the samples, environmental protection, estuary, farm use land, fertilization, field, forest plants land as well as garden, grasslands, green manure, to grow, irrigation, land of natural reserve and other nature conservation purposes, land of sanitary purpose, land plants, land protection, land purpose, land recultivation, list of land properties, loam, meadows, overwatering, peat, planting windbreaks, plowing rows, preserve, to prevent erosion protection, land quality evaluation, recreational resort use land, saline, sandy, separated locality, silt, soils boning, soil conservation, soil protection, soil rational use, soil stabilization, to stop topsoil loss, surface layer, vineyards, water fund land* to be involved into such textual abstract recognition as "*A land manager deals with environmental protection in general and with soil and land protection. Soil is the surface layer of the earth on which land plants grow. Its protection involves soil rational use, soil stabilization, land melioration, land recultivation through fertilization, irrigation and crop rotation apartly. A land manager must know about such kinds of soils as clay, sandy, peat, silt, soil and rock soils, saline soils, highly organic land (black soil), loam containing sand, clay and organic matter etc. as well as methods of soil conservation like rotation of cover crops or green manure with other crops, planting windbreaks to stop topsoil loss from wind,*

[4] Англійська мова для землевпорядників ОС «Бакалавр» : навч.-метод. посібник (видання 2) / укл. К. Г. Якушко. Київ : Експодрук, 2025. 162 с.

[5] Англійська мова для студентів спеціальності «Теплоенергетика» ОС «Бакалавр» : навч.-метод. посібник / К. Г. Якушко. Київ : Експодрук, 2023. 160 с.

perimeter runoff control to prevent erosion as well as grassways or plowing rows perpendicular to the hills. A land manager must detect the samples of bad unproductive lands and must be able to detect and to map marshland, brook or lake basin, estuary, preserve, gardens and fields, grasslands and meadows vineyards for every separated locality area. He must know about drip irrigation system to prevent overwatering during rain or high wind".

Nature thematic aspect is regarded to English classes for future thermal power engineers too combining knowledge from Physics and environmental protection.

It's worth to propose such category of students' text and vocabulary work within – reading and translation: adapting and translating scientific articles on thermal power plants, boilers, or turbines paying attention on the nature thematic textual blocks. Terminology exercises will help too through looking up the meanings of English energy-related terms (*boiler, turbine, heat exchanger*) as the tasks being devoted to fill-in-the-blanks trough inserting words into a text about heat exchange or power generation processes.

For example, the mentioned kinds of English tasks may be represented within such task as *"Read, translate, compose own vocabulary of unknown words as well as this text short retold version"* to be divided into several texts' variants. The first variant dealt with such nature thematic textual part as *"Future thermal power engineer studies subjects like Mathematics, Theoretical Grounds of Electrical Engineering, Resistance of Materials, Electrical Machines and Apparatus together with natural accent subjects like Chemistry, Physics, Technology of Animal Husbandry, Technology of Crop Growing, etc. Energy is the ability to perform work in two groups: kinetic energy and potential energy. Energy can't be created and it can't be destroyed. Mechanical, wind, solar and nuclear energies may be transformed into each other. Energetics (power engineering) is the scientific studying about energy flows during transformation and energy storage after transformation. dealing with thermodynamics, hydraulics, chemistry, biochemistry and ecological energetics"*. The second variant dealt with such nature thematic textual part as *"Biomass, methane, sun, wind, waterfall and wave energies are based on nonnuclear, renewable energy sources as well as technology improvement or reducing energy consumption. Geothermal energy deals with the facts about the first Italian geothermal power plant to be installed in 1904 and considering New Zealand to be the country with the biggest percentage of geothermal power to produce electricity because in these countries heat is close to earth surface (they can pump cold water down the hot rocks to get the hot water as a steam back to produce electricity)".* The third variant dealt with such nature thematic textual part as *"Hydro-electric power is everlasting natural energy production without pollution but shortening*

the previous landscape and conditions for wild animals and traditional plants existence. This source is predicted by building dam with lakes in the mountains to cause waterfalls with turbines. Wind energy deals with the facts that the first windmills were introduced in Iran to get grain flour more than thousand years ago and now wind generators are among the Americans' interests within their country to place more than four hundred thousand wind generators throughout Europe but some people do not like 5their look. Wind power is an important source of energy to provide about ten percent of the global requirement in electricity within two decades. Solar power deals with ability of obtaining solar panels not to recharge electric devices in artificial way". The last fourth variant dealt with such nature thematic textual part as "*In sunny areas they are widely in use exampling Mediterranean island of Cyprus where more than 90 per cent of buildings are equipped with solar panels with free hot water and no pollutants, they may make steam for electricity due to the mirrors to focus sun rays in one place. Every year solar power may be nearby 33 percent increased in a global capacity. By 2040 solar photovoltaics may provide about twenty five percent of the global requirement in electricity. It may become cost competitive with traditional fossils if the production of photovoltaic panels is increased to five hundred megawatts a year".*

To continue linguistic work with such nature thematic textual abstracts for future thermal power engineers is to answer connected following tasks exampling demand "*Propose what type of clean energy plant may be introduced in concrete region among the next ones: Geothermal power plant hydroelectric power plant wind power plant solar power plant mentioning the fact that Region 1 is placed in the mountains with a great amount of rain and snow to fall. What type of power plant would you recommend for it? What countries may be the illustration for such description? Would you like to visit them and why? Region 2 is a quite cold and windy place with very little amount of rainfalls. What type of power plant would you recommend for it? What countries may be the illustration for such description? Would you like to visit them and why? Region 3 is placed in very hot and dry desert with periodic wind masses. Region 4 is located on a small flat island in the middle of the Atlantic Ocean. Region 5 is with very changeable weather, it is placed near the volcano with no other hills in the neighbourhood"* or *"Find some your favourite expressions to express agreement or disagreement concerning the statements:*

1) Nuclear power deals with acid rains pollution.
2) New Zealand is a global leader to use wind power.
3) New Zealand is a global leader to use solar power.
4) New Zealand is a global leader to use geothermal power.
5) New Zealand is a global leader to use hydroelectric power.

6) USA is interested in wind power sources more than in other sources of clean energy.

7) USA is interested in solar power sources more than in other sources of clean energy.

8) In the Mediterranean island of Cyprus only fifteen percent of buildings are equipped with solar panels.

9) Windmills were firstly used in Iran to produce electricity but not flour for food.

10) Almost all people in Cyprus obtain power from turbines and waterfalls.

11) We were not born in the times when the first geothermal power station was opened in Italy.

12) It's not worth to put in the new battery into solar-powered electric device.

13) Renewable energy sources include sun, wind, waterfall, wind power and biomass.

14) Dangerous energy sources to pollute environment are oil, gas, coal and nuclear power.

15) Nuclear power leaves dangerous radioactive waste but does not produce gases for greenhouse effect and acid rains".

In its turn the next exercise is the example of demand to agree or disagree with the statement with the prepared your own arguments: *"Renewable resources are resources capable of being regenerated or replaced exampling biomass or energy from animal traction. Renewable resources are contrasted with non- renewable resources exampling fossil fuels and mined products".*

It's worth to say that nature thematic subject within English classes for future thermal power engineers nor only limited by physical phenomena but chemistry aspects too. While studying land surface types future thermal power engineer should involve into his passive and active foreign language vocabulary such specialized words being connected with nature studying vocabulary as *grind-ground-ground, to ground, field experiments, biogas digester, bright light, Commissioning, CSP (concentrated solar power), ESS (Energy storage system), energy yield, feed-in tariff, flame, GHG (greenhouse gas), grid-tied system, eclipce, heating and cooling, HVAC system, load profiling, to melt, off-grid system, peak shaving, thin-film technology, waste heat recovery.*

To prove the mentioned statement is to represent task "*Review the text and compose the vocabulary of unknown words in need"* to be divided into two textual abstracts. The first among them may be dealt with the words that "*Hydrogen is the ecologically clean and cheap commercially profitable fuel of the future. It is the lightest gas and obtains two times more thermal calories than the same quantity of gasoline but it is practically non-existent in its pure*

natural forms of coal, oil or natural gas. Hydrogen is extracted from acetylene, black carbon or graphite as well as from split water. Hydrogen is a fuel to run power stations, to make vehicle motors and even aircrafts work more perfectly more perfectly comparing with petrol analogues. In its turn the second among them may be dealt with the sentences that *"Any natural gas or coal may be adapted and have components to be extracted to get hydrogen fuel but it is still not completed experiments to obtain the hydrogen by thermochemical decomposition of water or storing in frozen or liquid state etc. But in our twenty first century it will be solved. Hydrogen is the subjects of investigation in petrochemical and metallurgical areas of knowledge. Besides, hydrogen vehicle motors do not heat up as much but can start engine easily in frost. Moreover, hydrogen is more convenient for transportation comparing to other fuel types.*

In order to continue linguistic work with the proposed nature theme is to choose the correct answers among the proposed variants and prove personal thought with adequate arguments from the previous textual abstracts to be shown as the tests kind linguistic tasks items: *"1) Hydrogen may be extracted from (A gas B water C thermochemical decomposition of water D either from water or from gas); 2) Hydrogen is the lightest of all (A substances B organic compounds C fuels D gases); 3) Hydrogen is convenient because of (A ease of transportation B ecological clean lines C economic and environmental problems D being obtained from the gas); 4) Hydrogen is a promising fuel in (A explosion B elimination C firewood D elimination); 5) Hydrogen is efficient for using (A in metallurgy B in petrochemistry C in farming D in cooking E either in petrochemical or metallurgical experiments); 6) Hydrogen in the 21st century will be obtained by (A present day technology B ecological cleanliness C thermochemical decomposition of water D burning of natural gases); 7) Hydrogen deals with the problem how (A to be gained from water B to be stored in a frozen state C to become cheaper D to be obtained from water as well as to be stored in a frozen state"*.

Basing on the purpose to deeper practical skills concerning the proposed linguistic tasks for future thermal power engineers is to propose to mark the difference between diesel and biodiesel as well as to compose the list of renewal energy sources in general or to propose conversational phrases to express agreement or disagreement concerning seven sentences. The first adequate sentence says that biodiesel works at any car, the second sentence tells student that biodiesel is as poisonous as fossil fuels and the third sentence tells future thermal power engineer that plant shortages slow the spread of biodiesel. Besides the fourth sentence supports the thought that our consumers use alternative kinds of oil less than fossil ones and the fifth sentence deals with the possible fact that biodiesel breaks down in a natural way as well the sixth

sentence says that biodiesel has renewable source and the last seventh sentence concerning this exercise convinces that biodiesel demands much field to grow its donor-plant.

Similar tasks kind proposes to represent some arguments, as well as to add to the convince another thought follower as well as propose what may be the solution to reconcile different thoughts followers.

In order to fulfill this task is to watch some biodiesel supporter's or opponent's arguments exampling the facts that *"Biodiesel may be better because it is produced by plants to replace petroleum, this kind of fuel is completely non-toxic, biodegradable and renewable"* or *"The plant to produce biodiesel like rape demands large space for growing and occupies large territory of farmland, exhausts it, does not allow to grow eatable crops, changes traditional animals habitats"*.

It's worth to say that nature theme subject sentences for future thermal power engineers like *"Daylight sensors, ground source heat pumps, radiant floor heating system and high-efficiency lighting are to be predicted", "Hydro-electric power is everlasting natural energy production without pollution but shortening the previous landscape and conditions for wild animals and traditional plants existence", "This source is predicted by building dam with lakes in the mountains to cause waterfalls with turbines"* or *"Natural conditions make it possible to exchange fuels for renewable sources of energy"* may be included into foreign speech fixing tasks like composing different types of questions, finding synonyms to replace, thought shortening or continuing etc.

We are convinced that the list of the previously applied vocabulary with the accent on physical and chemical natural processes may become background for grammar phenomena samples, oral and written communication as well as for the – skills to construct technical description while composing sentences in the passive voice to describe equipment or – summarizing and abstracting while writing a summary in English of a Ukrainian technical document as well as conducting business correspondence while drafting emails to international partners or engineers or improving listening and speaking, discussing thermal power physical and chemical processes, diagrams, describing the operating principle of a power plant, listening to lectures: answering questions following audio or video material on energy conservation is also in need to provide different kinds of foreign speech developing tasks. Moreover, according to previously mentioned T. Datska's observation, even senior student of secondary school and the freshmen- future power engineers are in need to write a letter to a statesman (politician) who intends to reopen coal mines and halt investment in alternative energy sources. This politician also does not believe in global warming. In the letter, students must express their opinion on the matter.

3. Nature subject English tasks for future sport instructors

Now it's need to introduce tasks concerning detailed nature theme filling within concrete sphere of training exampling future coaches-sport instructors basing upon our previous adequate specialty manual with tasks[6].

And now it's a turn to represent some biological aspects tasks to be proposed to another category of students – future athletes – physical state development coaches starting from studying and further involving into foreign language speech several biological terms exampling *reproduction, cell, tissue, metabolism, growth, nutrition, respiration, feet shoulder-width apart, fingers, head, heel, eye, mouth, palms, saliva, shoulder, blood pressure, brisk walk, daily physical activity, dementia, health, heart diseases, injury, limb, muscle and bones strength, toes of the foot, top of the foot, tongue,waist, excitation, contraction, moving a muscle through a long distance against low resistance, the cardiovascular system, amount of blood that the heart can pump, proliferation of small blood vessels that carry oxygen to the muscles, muscles are moved through a short distance against a high resistance, the thickness of the muscle fibres, to perform life functions* etc as well as specification some answers according to the following range of questions exampling such versions as *"Have physical exercises been practised in China less than for hundreds of years?", "In recent years only Chinese hospitals have created a variety of remedial exercises, have not they?", "Chinese physical exercises are based on modem theories of anatomy, sports physiology but not biomechanics, are not they?", "Chinese physical exercise may be practised both in the morning and in the evening, may not they?", "Persistent physical practice will decrease your appetite, will not it?", "Persistent physical practice will help you to sleep more soundly, will not it?", "Persistent physical practice will decrease your resistance to disease, will not it?", "What is physiology?","What basic activities does physiology study?", "Physiology is not linked with anatomy, medicine or chemistry, is it?", "Physiology concerns only studying functional anatomy of humans and animals, does not it?", "What does human physiology demand together with regular physical exercises?", "What cases may alcohol and drug intake be favourable for human physiology?", "All physical exercises are isotonic, are not they?", "Pushing and pulling of immovable object increase the amount of blood that the heart can pump, do not they?", "Glycogen is the fuel for muscular activity, is not it?", "The blood vessels of stomach carry oxygen to the muscles, do not they?", "What realistic goals may be set on the first stages of physical activity?", "What does physical activity*

[6] Англійська мова для студентів спеціальності «Фізична культура і спорт» ОС «Бакалавр») : навч.-метод. посібник / укладач: К. Г. Якушко. Київ : Експодрук, 2024. 163 с.

support?", "What does physical activity decrease?", "Should physical exercise be a chore? Why?", "Is it useful for health to avoid getting off a stop early or parking further away as well as to avoid walking part of your commute?", "Must we go in for sports alone?", "Is it useful for health to avoid sitting for long periods?", "Is it pleasant to break and to stretch your legs as an injury? and "An easy way to increase your daily physical activity is using of elevators instead of stairs, is not it?" etc.

In general English language tasks on the topic of human body structure for physical education students may include vocabulary exercises, movement descriptions, and work with anatomical terms exampling labeling, matching and fill-in-the-blanks. As it is predicted vocabulary and anatomical tasks for future specialists in physical culture/training may include labeling by proposing tasks to identify muscles, joints and bones (e.g., biceps, quadriceps, spine, knee joint) on a body diagram. Besides, matching may become important kind of English tasks too. We consider it's worth to propose future PT specialists to connect body part titles with their sports-related functions (thus, *hamstrings* may be connected with *running and shoulders* may be connected with *lifting*) with the help of matching. Moreover fill-in-the-blanks tasks may be in need too for the mentioned category of students to propose inserting the correct words into a text about warm-ups or body structure exampling the task "*Rewrite the missed words from the lists to add the sentence as well as propose your own versions not to be mentioned previously at all: Physical power* ***is*** *the ability to exert maximal force in the shortest possible time, combining strength with speed to produce explosive movements. It's a key component of fitness for activities like sprinting, jumping, swinging, hitting… (ability to exert, to combine strength with speed, physical power, sprinting, throwing, jumping, swinging, hitting, cutting, stretching, twisting, squatting, pushing up).*

In order to add the proposed kinds of linguistic tasks concerning anatomy is also to propose practical and motor tasks exampling action description by writing sentences about which muscles are working during a specific exercise (for example, *"When you do push-ups, you use your chest and triceps"*) as well as True/False game for checking facts about sports anatomy and physiology as well as translating sports injuries or names of muscle groups from Ukrainian to English.

This adequate kind of task concerns the demand *"Represent the main idea in one Ukrainian sentences, as well as note four new words from this abstract"* may be divided into several textual variants. The first among them deals with the information *"Regularity of exercise is desirable, and it is important that no form of violent exercise or extreme exertion is undertaken suddenly. A gradual warming-up and preparatory process is essential to prevent injury. Becoming*

fit involves taking some form of regular exercise; walking is, for example, one of the most effective forms of exercise and can be included in everyday life. Swimming, cycling, aerobics and dancing (plus basic exercises which can be done almost anywhere) are also very helpful. Many forms of sport and ball games can make a contribution to fitness. The practices of yoga and tai chi, which are increasing in popularity, are also highly beneficial" as well as the second proposed textual abstract to train specialists in physical culture mentions the next information: "*Physical education, physical culture and sports are the most economically beneficial and effective way to prevent diseases, strengthen the gene pool, increase the potential of labor resources, psychophysical health, increase the welfare of the population and solve other social problems. The demand and popularity of the sport is fully justified. After all, sport is not only self-organization and discipline, health and youth, an element of culture and lifestyle – it is life itself, moving forward"* as well as the third textual variant is formed in such way as *"Athletic injuries surveys have shown that most football and basketball injuries involve the knee injury, either through twisting or due to lateral force. Surgery for such injuries has become much simpler with the invention of the arthroscope, a thin device containing a fibre-optic light that can be inserted into a thin slit in the knee. Repair can be accomplished through this narrow opening. Athletic injuries surveys have shown that most football and basketball injuries involve the knee injury, either through twisting or due to lateral force. Surgery for such injuries has become much simpler with the invention of the arthroscope, a thin device containing a fibre-optic light that can be inserted into a thin slit in the knee. Repair can be accomplished through this narrow opening"*.

In order to represent next three textual variants, it is in need to mention the fourth textual abstract *(Physical fitness is an ability of the human body to meet demands imposed by the environment and daily life. Fitness is a state of body that helps develop a more positive and dynamic attitude to life and is likely to affect most phases of human existence. Efficiently working lungs and heart, general alertness, muscular strength, energy, and stamina are the overt signs of physical fitness. It is usually measured in relation to functional expectations: that is, typically, by periodic tests which measure strength, endurance, agility, coordination, and flexibility. In addition, stress testing (for example, using an ergometer) which gauges the body's response to powerful, sustained physical stimulus, is used to analyze fitness…"*), the fifth textual abstract *("Prevention of injuries depends primarily on good conditioning. Athletes are also protected by the use of better padding materials and of face masks in hockey and eye protectors in squash and other racquet sports. Smoking and drugs (except those prescribed as medication) are likely to seriously damage one's health,*

and excessive alcohol intake is also detrimental to health. The general rule for fitness trainer to stop exercise as soon as physiological discomfort is felt: that is, as soon as breathing is laboured, circulation seems inadequate, or fatigue influences performance. Those with health problems caused by heart attacks, strokes, injuries, and illness, including conditions such as arthritis, should see a doctor before devising a regime or embarking on any form of strenuous exercise) and the sixth textual abstract *("Long-distance runners also suffer of knee injuries but a more common health problem for runners is the stress fracture, which is a weakening of the front of the shinbone caused by overuse, with pain and possible bone cracking as the result. Ligament tears are more common in gymnastics. Long-distance runners also suffer of knee injuries but a more common health problem for runners is the stress fracture being a weakening of the front of the shinbone caused by overuse, with pain and possible bone cracking as the result").*

In order to propose the seventh textual variant it is worth to mention such textual abstract as *"Physiology is a study of the physical and chemical processes, which take place in living organisms during the performance of life functions. It is concerned with such basic activities as reproduction, growth, metabolism, respiration, excitation, and contraction dealing with the fine structure, the cells, tissues, and organ systems of the body. There are two kinds of fitness exercises: isotonic and isometric ones. Physiology is closely linked with anatomy and was historically considered a part of medicine and chemistry. Physiology studies functional anatomy of humans, animals as well as plant physiology, studying photosynthesis and other processes of plant life. Human physiology demands regular physical exercise together with a well-balanced nutrition"* as well as the eighth one may be represented as *"Physical fitness is an ability of the human body to meet demands imposed by the environment and daily life. Fitness is a state of body that helps develop a more positive and dynamic attitude to life and is likely to affect most phases of human existence. Efficiently working lungs and heart, general alertness, muscular strength, energy, and stamina are the overt signs of physical fitness. It is usually measured in relation to functional expectations: that is, typically, by periodic tests which measure strength, endurance, agility, coordination, and flexibility. In addition, stress testing (for example, using an ergometer) which gauges the bod".*

In order to deeper nature studying human body structure facts it's recommended to propose such tasks a *"Write the variants numbers being relative to isotonic exercises" choosing one among eight proposals.* The first adequate proposal may be represented in such variant as *"increase the ability to store glycogen as the fuel for muscular activity"* the second one as *"move a muscle through a long distance against low resistance"*, the third one as

"increase the thickness of the muscle fibre" and the fourth one as *"increase the amount of blood that the heart can pump"*. In its turn the fifth variant may be represented in such version as *"cause proliferation of small blood vessels that carry oxygen to the muscles"*, the sixth one as *"muscles are moved through a short distance against a high resistance, while pushing or pulling an immovable object"*, the seventh one as *"develop large muscles"* and the last eighth proposal to be analyzed within the version *"in running, swimming or gymnastics for beneficial effects on the cardiovascular system"*. Similar aim concerns the task to write the variants numbers being relative to isometric exercises comparing and choosing correct answer among eight variants too. In order to choose definitions being relative to isomentric physical exercises is to analyze such first variant as "*increase the ability to store glycogen as the fuel for muscular activity",* such second variant as*" move a muscle through a long distance against low resistance",* such third variant as*"increase the thickness of the muscle fibres",* such fourth variant as *"increase the amount of blood that the heart can pump"* as well as such fifth variant as*"cause proliferation of small blood vessels that carry oxygen to the muscles",* such sixth variant as *"muscles are moved through a short distance against a high resistance while pushing or pulling an immovable object",* such seventh variant as *"develop large muscles"* and such eighth variant as *"in running, swimming or gymnastics for beneficial effects on the cardiovascular system"*.

The development of future athletes' critical thinking deals with choosing of the most suitable – the most useful and the least suitable – the least useful advice as the background for further arguments taking into account and comparing some ten recommendations to improve physical state activity. The first advice to keep good physical fit deals with the recommendation "*to set realistic goals: making a commitment to increase your physical activity is an important first step. Setting a goal (e.g. get 10.000 steps every day) and planning what you need to do to achieve this goal (e.g. plan to walk part of your commute) can help keep you focused and committed"* and the second one deals with the recommendation to take the stairs instead of lifts or elevators wherever possible as well as to try joining a sports team or going for a run or brisk walk with a friend. The third advice to keep good physical fit deals with the proposal *"to take regular breaks to walk around and stretch your legs as well as to avoid sitting for long periods. Move two or more limbs together (for example, two arms, two legs, or one leg and one arm) while remaining in place. Use muscles to lift, to push, to pull, or to carry heavy objects"*. The fourth advice to keep good physical fit deals with the recommendation to make physical activity fun because *"physical exercise shouldn't be a chore, if we don't enjoy it we won't be able to keep it up for long finding* an activity that you enjoy and can stick to long-term. The fourth advice

to keep good physical fit deals with the recommendation to become "*sure that regular physical activity supports a healthy body weight and increases muscle, bones strength and functioning as well as decreases the risk of heart disease, normalizes blood pressure or lowers the risk of diabetes, cancers, dementia as well as it promotes positive mental health".* The last advice to be compared and chosen by future specialists in physical culture is the recommendation to *"begin your training with a warming-up, which is very useful for our body in order to prevent injuries and pulling muscles consisting of slow running, fast running and free standing exercises"*.

CONCLUSIONS

1. Nowadays it is actual to develop foreign language linguistic skills in general and concerning nature subject as example while studying professional purpose English in order to become specialist after graduation from Ukrainian higher educational establishment.

2. We have successful attempt to prove the need to continue nature subjects' tasks application almost within every natural sphere higher educational establishment as well as to propose some nature thematic tasks to be used on practice while English training for some professional categories of students dealing with technical and agrobiological branch of science.

3. Professional themes concerning nature subject themes are to be involved into English classes at secondary school and are to be in details for separate specialists of junior years of Bachelor's course. Studying basing upon vocabulary ecology, geography, physics, chemistry, botanic, anatomy and agriculture itself.

4. There are different kinds of English classes to involve nature subject thematic vocabulary to be used for future agronomists, ecologists, land managers, thermal power engineers as well as for specialists in physical culture to develop reading, writing, oral conversation, listening as well as command work and critical thinking.

SUMMARY

This chapter deals with the need to give the samples of English lessons tasks' being attached to the nature studying aspects involving practical experience of training some categories of technical and agrobiological sphere junior bachelor's coarse students within the National University of Life and Environmental Sciences of Ukraine to develop different speech activities and to prove necessity of biological education at all. The perspectives of further observation is to analyze some additional textbooks with the tasks containing nature subject as well as to spread the range of specialties to be observed.

Bibliography

1. Сорокіна С., Кущ Ю., Федяй І. Роль практичної біологічної освіти у підготовці молодих науковців: аналіз та перспективи. *Академічні візії,* вип. 30, 2024. URL: https://academy-vision.org/index.php/av/article/view/1042/923

2. Дацька Т., Голик О. Формування мовленнєвої компетентності «екологічна грамотність і здорове життя» у підручниках з англійської мови для старших класів. URL: https://ipvid.org.ua/index.php/psp/article/view/652/664

3. Якушко К. Г. Методичні вказівки «Збірник практичних робіт з англійської мови для студентів 1-го курсу факультету інженерії агробіосистем». Київ : Видавництво «Ту-Прінт», 2011. 60 с.

4. Англійська мова для землевпорядників ОС «Бакалавр» : навч.-метод. посібник (видання 2) / укл. К. Г. Якушко. Київ : Експодрук, 2025. 162 с.

5. Англійська мова для студентів спеціальності «Теплоенергетика» ОС «Бакалавр» : навч.-метод. посібник / К. Г. Якушко. Київ : Експодрук, 2023. 160 с.

6. Англійська мова для студентів спеціальності «Фізична культура і спорт» ОС «Бакалавр») : навч.-метод. посібник / укладач: К. Г. Якушко. Київ : Експодрук, 2024. 163 с.

Information about the author:
Yakushko Kateryna,
Candidate of Pedagogical Sciences,
Associate Professor at the Department of English for Technical and Agrobiological Specialties
National University of Life and Environmental Sciences of Ukraine
15, Heroyiv Oborony Street, Kyiv, Ukraine

NOTES

NOTES

NOTES

Izdevniecība “Baltija Publishing”
Avotu iela 8 k-1 - 25, Rīga, LV-1011
E-mail: office@baltijapublishing.lv

Iespiests tipogrāfijā SIA “Izdevniecība “Baltija Publishing”
Parakstīts iespiešanai: 2026. gada 9. oktobrī
Tirāža 300 eks.