Riga Nordic University

Drohobych Ivan Franko
State Pedagogical University

SCIENTIFIC STRATEGIES FOR CONSERVING AND RESTORING NATURAL ECOSYSTEMS UNDER ANTHROPOGENIC PRESSURE

Scientific monograph

IZDEVNIECĪBA
BALTIJA
PUBLISHING
2025

Recommended for printing and distribution via Internet
by the Academic Council of Baltic Research Institute
of Transformation Economic Area Problems according
to the Minutes № 12 dated 24.12.2025

REVIEWERS:
Djakons Romans – Dr.sc.ing., Professor, Academician, Chairman of the Board of Riga Nordic University;
Voloshanska Svitlana Yaroslavivna – Candidate of Biological Sciences, Associate Professor, Associate Professor at the Department of Biology and Chemistry, Drohobych Ivan Franko State Pedagogical University;
Hoivanovych Nataliia Kostiantynivna – Candidate of Biological Sciences, Associate Professor, Associate Professor at the Department of Biology and Chemistry, Drohobych Ivan Franko State Pedagogical University;
Lupak Oksana Mykolaivna – Candidate of Agricultural Sciences, Associate Professor at the Department of Medical and Biological Disciplines, Geography and Ecology, Drohobych Ivan Franko State Pedagogical University.

Scientific strategies for conserving and restoring natural ecosystems under anthropogenic pressure : Scientific monograph. Riga, Latvia : "Baltija Publishing", 2025. 518 p.

© Riga Nordic University, 2025
© Drohobych Ivan Franko
State Pedagogical University, 2025

ISBN 978-9934-26-654-6

COTENTS

FLORA AND VEGETATION

Chapter 1
Features of the condition and reproduction of the main Forest-forming species and nut-bearing species in the forest-steppe conditions (Neyko I. S., Matusyak M. V., Neyko O. V.) . . . 2
1. Characteristics of the condition and reproduction of common oak in clonal plantations . . . 3
2. Current condition and reproduction level of the Douglas fir family plantation . . . 10
3. Features of the reproduction of Ukrainian-bred hazelnut varieties . . . 17

Chapter 2
Current state of the phytocenosis of the Runa Meadow of the Carpathians (Feketa I. Yu.) . . . 27
1. Phytocenotic diversity of the Runa Meadow . . . 29
2. Influence of abiotic environmental factors on the formation of the flora of the Runa Meadow . . . 33
3. Current state, problems, and prospects for the use of phytocenoses of the Runa Meadow . . . 39

ECOLOGY

Chapter 3
Environmental principles in the development of scientific strategies for the conservation and restoration of natural ecosystems under anthropogenic pressure (Voloshanska S. Ya., Kvasnii L. H., Drozd I. F.) . . . 48
1. Ecological prerequisites for the formation of scientific strategies for the conservation of natural ecosystems . . . 49
2. Scientific approaches to ecosystem restoration under anthropogenic pressure . . . 51
3. Features of developing scientific strategies for the conservation and restoration of ecosystems in Ukraine . . . 53

Chapter 4
Bacteria from environments with extreme conditions as biological agents for the development of preparations for plant growth promotion (Hnatush S. O., Komplikevych S. Ya., Maslovska O. D.) 60
1. Characteristics of the bacteria used in the study 62
2. The effect of bacteria resistant to environmental factors on the growth of wheat seedlings 65
3. The effect of compositions of resistant to environmental factors strains of bacteria on the morphological and physiological parameters of wheat seedlings 72

Chapter 5
Monitoring and assessment of atmospheric air quality: sources of pollution and impact on ecosystems (Dunaievska O. F., Sokulskiy I. M., Hutyy B. V.) 86
1. The condition of the air basin as an indicator of environmental quality 91
2. Sources of atmospheric pollution and their environmental consequences 101

Chapter 6
Ecological-coenotic differentiation of syntaxa of the class Carpino-Fagetea sylvaticae of the Left-Bank Forest-Steppe of Ukraine according to phytoindication parameters (Kalinskyi P. V., Goncharenko I. V., Drebot O. I.) 119
1. Materials and methods of research 121
2. Results and their discussion 125

Chapter 7
Ecological aspects of territorial community management in the system of preservation and restoration of natural ecosystems (Kvasnii Z. V., Senkiv V. M., Danylenko Yu. V.) 138
1. The role of ecological principles in the formation of natural resource management strategies of territorial communities 139
2. Mechanisms for integrating environmental strategies into the management system of territorial communities 142
3. Environmental priorities of the management of territorial communities of Ukraine in conditions of war and post-war recovery 144

Chapter 8
Natural ecosystems: fighting hunger, energy and raw materials deficits in the modern world (Kichura D. B., Sobechko I. B.) 153
1. Edible microbes 154

2. “Homemade liver” from microbes . . . 155
3. Plants that fertilize themselves . . . 157
4. New plants from a test tube . . . 159
5. Microbes against pests . . . 161
6. “Frost-resistant” bacteria . . . 162
7. Clean water thanks to the work of microbes . . . 163
8. Biosensors: Microbes signal pollution . . . 165
9. Renewable energy sources . . . 166
10. Bioethanol Project in Ukraine . . . 167
11. Biogas will save tropical forests . . . 173
12. Silent mining . . . 174

Chapter 9
Smart Agriculture: Prospects and Challenges of Using Compact Hydroponic Modules (Kovalov M. M.) . . . 180
1. Genesis and Evolution of Compact Hydroponic Systems . . . 182
2. Technological Component: Integration of IoT and Artificial Intelligence . . . 187
3. Ecological and Economic Potential of Compact Farming . . . 193

Chapter 10
Ecological spatial assessment of the territory as a basis for strategic spatial planning of the development of territorial communities in Ukraine (based on the example of the project “Alley 12.7 km”) (Smirnova M. P.) . . . 208
1. Relevance of the topic . . . 209
2. State of research and gaps in the field . . . 210
3. Methodology, research methods, and description of the process “Alley 12.7 km” . . . 215
4. Results of the project “Alley 12.7 km” . . . 219
5. Discussion . . . 229

Chapter 11
Environmental aspects of modern pharmaceutical biotechnology: sustainable waste management and phytomanagement of territories (Fedoryshyn O. M.) . . . 235
1. The eco-oriented paradigm of the pharmaceutical sector: from EU regulatory requirements to risk assessment . . . 236
2. Innovative technologies for bioremediation and purification of industrial flows from pharmaceutical companies . . . 240
3. Circular biotechnology: development of biodegradable polymer materials and drug delivery systems . . . 243

Chapter 12
Protection and restoration of Ukraine's natural ecosystems in the context of international commitments and European integration (Fesyuk V. O., Moroz I. A., Polianskyi S. V.) . . . **248**
1. Ukraine's international obligations in the field of protection and restoration of natural ecosystems . . . 249
2. Theoretical and methodological foundations of ecosystem restoration in the context of nature conservation activities . . . 252
3. Specific problems in implementing nature restoration measures in Ukraine . . . 261

BIOLOGICAL RESEARCH

Chapter 13
Comprehensive approaches to the prevention of oxidative stress and immunodeficient conditions in animals under technogenic load (Vus U. M., Hutyy B. V.) . . . **270**
1. Use of L-carnitine as a metabolic corrector in animal husbandry . . . 271
2. The role of vitamins E and B_{12} in maintaining metabolic balance and immune status of animals . . . 275
3. Biological role of selenium, zinc, and methionine in maintaining antioxidant status and metabolic balance of the animal organism . . . 279

Chapter 14
Theoretical and Experimental Substantiation of the Development of Hydrogel Systems with Polyphenols (Duk N. M.) . . . **294**
1. Analysis of Current Trends in the Development of Bioactive Hydrogels . . . 296
2. Natural Polyphenolic Compounds: Classification, Properties, Biological Activity, and Methods of Isolation . . . 298
3. Mechanisms of Antiseptic, Antioxidant, and Anti-Inflammatory Action of Polyphenols . . . 299
4. Prospects for the Use of Polyphenols in Hydrogel Systems for Biomedical and Dermatological Applications . . . 300

Chapter 15
Genetically modified organisms in food impact on the ecosystem (Kichura D. B., Sobechko I. B.) . . . **306**
1. Why do we use GMOs? . . . 308
2. The GMO problem and risks . . . 312
3. GMOs as medicines . . . 314

4. GMOs – harm or benefit? . . . 316
5. Distribution of genetically modified soybean in Ukraine . . . 318
6. Genetically modified rice . . . 321
7. Food safety and genetics . . . 323

Chapter 16
Regulation of bioethical aspects of scientific research (Lavryniuk O. O., Mudrenko V. P.) . . . 331
1. Evolution of Informed Consent in the Era of Biotechnological Monitoring . . . 333
2. Ethical Aspects and Regulatory Mechanisms of Animal Research . . . 341
3. Ethical Regulation of Digital Diagnostics and Multi-level Standards Control . . . 347

Chapter 17
Functional food products in the Ukrainian public health system: adaptation of European experience and technological aspects of formulation development (Neposhyvailenko N. O., Korniienko I. M.) . . . 355
1. Theoretical justification for the use of functional food products in the adolescent health preservation system . . . 357
2. Research concept . . . 370
3. Experimental evaluation of functional properties and health-improving potential of food products newly introduced into the daily adolescent diet . . . 373

Chapter 18
Biologically active compounds of *Curcuma longa L.* and aspects of their application (Sachuk A. T., Konechna R. T.) . . . 389
1. Characteristics of *Curcuma Longa. L.* . . . 390
2. Characteristics of curcumin . . . 395

PHYSICAL AND GEOGRAPHICAL RESEARCH

Chapter 19
Long-term temperature change in Ukraine (1900–2021): trends, variability and scenarios (Boychenko S. H., Maidanovych N. M.) . . . 412
1. Long-time changes of average annual surface air temperature on the territory of Ukraine for the period from 1900 to 2021 . . . 416
2. The annual cycle of surface air temperature on the territory of Ukraine . . . 420
3. Scenarios of warming in Ukraine . . . 425

Chapter 20
Hydroecological state and functioning of the Shchyrets Reservoir under anthropogenic load (Ivanov Ye. A., Pylypovych O. V., Bilanyuk V. I.) 433
1. Geographic location 434
2. Reservoir characteristics 434
3. Hydrological conditions of the Shchyrka River basin 436
4. Hydrochemical and sanitary-hygienic condition of the reservoir 445
5. Population load and water use 450
6. Land use structure in the reservoir basin 454

Chapter 21
Theoretical, methodological and applied aspects of the study of lake sedimentation in the conditions of Polissya, Ukraine (Ilyina O. V., Ilyin L. V.) 463
1. Theoretical aspects of the study of lake sedimentation 464
2. Mineral component of bottom sediments 468
3. Biogenic elements of bottom sediments 474
4. Distribution and typification of limnogeochemical sedimentary complexes and the possibilities of their economic use 478

Chapter 22
Modern Trends in the Development of River Systems of the Peredkarpattia under Climate Change and Anthropogenic Pressure (Palanychko O. V.) 487
1. Study Area and Physical-Geographical Preconditions for the Formation of River Systems within the Peredkarpattia 490
2. Current Climate Trends and the Hydrological Regime of River Systems within the Peredkarpattia 495
3. Anthropogenic Pressure on River Systems within the Study Area 497
4. Geoecological Consequences of Contemporary Climate Change and Anthropogenic Pressure on River Systems of the Peredkarpattia 500

01
SECTION

FLORA AND VEGETATION

CHAPTER 1

ОСОБЛИВОСТІ СТАНУ ТА РЕПРОДУКЦІЇ ОСНОВНИХ ЛІСОТВІРНИХ ПОРІД ТА ГОРІХОПЛІДНИХ В УМОВАХ ЛІСОСТЕПУ

Нейко І. С., Матусяк М. В., Нейко О. В.
DOI https://doi.org/10.30525/978-9934-26-654-6-1

ВСТУП

Ліси на сьогоднішній час є ключовими екосистемами, які забезпечують стійкість природного середовища та є осередком збереження ландшафтного та біологічного різноманіття. Лісові екосистеми впродовж тривалого часу (понад 200–300 років) зазнали суттєвого антропогенного впливу, що призвело до порушення їх генезису, зміни вікової та породної структури деревостанів. Враховуючи зазначені тенденції, на міжнародному рівні було прийнято ряд важливих ініціатив щодо збереження лісових генетичних ресурсів як окремих країн так і світу[1, 2, 3, 4].

Одним із ключових критеріїв збалансованого ведення лісового господарства сьогодні є збереження лісових генетичних ресурсів[5, 6]. Цей критерій прийнятий з огляду на погіршення стану лісів, зміну їх породної структури, зниження генетичної цінності та загальної

[1] Данчук О. Т. Лісонасінна база в Україні: сучасний стан та шляхи розвитку. *Наукові праці Лісівничої академії наук України.* 2017. Вип. 15. С. 45–53.

[2] Нейко І. С., Мудрак Г. В., Нейко О. В., Дідур І. М., Матусяк М. В., Козак Ю. В. Лісові генетичні ресурси у контексті збереження біорізноманіття Вінниччини : монографія. Вінниця : ТВОРИ, 2022. 500 с.

[3] Юрків З. М., Матусяк М. В., Циганська О. І., Амонс С. Е. Репродуктивний потенціал та характеристика репродуктивної здатності сосни звичайної (*Pinus silvestris L.*) фінського походження на клоновій плантації в умовах Вінниччини. *Аграрні інновації. Селекція, насінництво*. 2025. Вип. 3. С. 244–254.

[4] Neyko, I., Monarkh, V., Poznyakova, S., Matusyak, M. State of in situ forest genetic resources of broadleaved tree species in the Right-bank Forest-Steppe of Ukraine. *Folia Forestalia Polonica, Series A – Forestry*, 2021, Vol. 63 (2), 88-96.

[5] Нейко І. С., Мудрак Г. В., Нейко О. В., Дідур І. М., Матусяк М. В., Козак Ю. В. Лісові генетичні ресурси у контексті збереження біорізноманіття Вінниччини : монографія. Вінниця : ТВОРИ, 2022. 500 с.

[6] Юрків З. М., Нейко І. С. Перспективи підвищення продуктивності лісів методами лісової селекції та лісового насінництва. *Сільське господарство та лісівництво*. 2017. № 7. С. 24–32.

продуктивності деревостанів. Одним із негативних аспектів сьогодні є порушення природного генезису лісових екосистем, що призводить до значного скорочення площі лісів природного походження.

Для розв'язання завдань стосовно забезпечення відповідного рівня біологічного та генетичного різноманіття є необхідність щодо широкого запровадження генетико-селекційних методів як на індивідуальному так і популяційному рівнях. Важливість генетико-селекційних підходів зумовлені погіршенням стану середовища, кліматичними змінами що є наслідком зростання антропогенезу. Викладені аспекти зумовлюють необхідність щодо активізації комплексних наукових досліджень стосовно розробки заходів щодо удосконалення методів та способів індивідуального і популяційного відбору для підвищення репродуктивних функцій основних деревно-чагарникових видів[7, 8, 9, 10, 11, 12, 13].

1. Характеристика стану та репродукції дуба звичайного на клонових плантаціях

Вивчення репродуктивних процесів, зокрема, оцінювання цвітіння, утворення зав'язей та плодоношення проводилося в умовах селекційного комплексу Державного підприємства «Вінницька лісова науково-дослідна станція». Оцінювання інтенсивності формування репродуктивних органів та стану проводили впродовж 2008–2025 рр.

---

[7] Настанови з лісового насінництва (2-е видання, доповнене і перероблене) / УкрНДІЛГА. Харків, 2017. 107 с.

[8] Нейко І. С., Матусяк М. В., Нейко О. В. Вплив кліматичних змін на стан та репродуктивні процеси сосни звичайної фінського походження. *Сільське господарство та лісівництво*. 2023. Вип. 1 (28). 137–161.

[9] Нейко І. С., Матусяк М. Ф., Разанов С. Ф., Разанова А. М., Мудрак Г. В. Репродуктивні процеси на клонових плантаціях ялини європейської фінського походження в контексті сталого лісового господарства. *Сільське господарство та лісівництво*. 2025. Вип. 1 (36). С. 132–146.

[10] Нейко І. С., Оплаканська А.Б, Панкова С. О. Особливості функціонування лісонасіннєвих плантацій дуба звичайного (*Quercus robur, L.*) в умовах Правобережного Лісостепу України. *Аграрні інновації*. 2024. Вип. 25. С. 129–133.

[11] Нейко І. С., Юрків З. М. Адаптивна здатність та особливості утворення репродуктивних органів сосни звичайної (*Pinus sylvestris L.*) фінського походження на клоновій плантації в умовах Вінниччини. *Вісник Житомирського національного агроекологічного університету*. 2017. № 1 (58). Т. 1. С. 120–127.

[12] Юрків З. М., Блистів В. І., Нейко О. В., Гула Л. О. Питання теорії та практики інтродукції деревних видів. *Стале ведення лісового господарства в умовах кліматичних змін: від досліджень до практики* : Міжнародна науково-практична конференція з нагоди 100-річчя ВП НУБіП України «Боярська лісова науково-дослідна станція». Боярка. 2025. С. 355–359.

[13] Neiko I. S., Matusiak M. V., Neiko O. V., Vradii O. I., Alieksieiev O. O. Characteristics of the condition and reproductive processes of trees in a clone plantation of *Pinus sylvestris l.* Finnish origin in the conditions of Lytyn forestry of the Vinnytsky regional forestry. *Сільське господарство і лісівництво*. Вип. 4 (39). С. 15–29.

У 2018 році з метою оцінювання впливу різної інтенсивності зрідження на плантаціях застосовано вирубування окремих рядів. Зокрема, на ділянках клонових насіннєвих плантацій дуба звичайного № 5, 6, 7 1977–1978 років створення було видалено по 1-му та по два ряди[14, 15].

Дослідження щодо особливостей формування фенологічних форм проведено нами впродовж останніх 5-ти років. Зокрема, нами видено наступні фенологічні форми дуба: рання (Р), рання проміжна (РПр), проміжна (Пр), пізня проміжна (ППр) та пізня (П). На ділянці № 5 (без зрідження) виявлено найбільше представництво дерев пізньої проміжної фенологічної форми. Зокрема, відносна частка дерев зазначеної фенологічної форми становила близько 35 %. Найнижчою часткою дерев представлена рання проміжна фенологічна форма (частка дерев 2–5 %).

Найнижчим представництвом на ділянці № 5 характеризувалися рання та рання проміжна фенологічна форма. Частка дерев цих фенологічних форм становила близько 2,5–5,0 %. Найбільшим представництвом на ділянці № 6 (із середнім ступенем зрідження) були дерева пізньої проміжної форми (близько 40 %). На рівні 21–22 % було представництво проміжних та пізніх фенологічних форм. На ділянках № 6 та № 5 найнижчою була частка дерев ранньої проміжної та ранньої фенологічних форм (близько 7–10 %).

Подібним також є розподіл фенологічних форм дерев на ділянці із високим ступенем зрідження № 7. Так, відсоток пізніх проміжних форм на цій ділянці є найвищим – 28 %. Значно нижчим є наявність проміжних та пізніх фенологічних форм – 22–25 %.

У 2025-му році інтенсивність плодоношення нами визначалася для кожного дерева. Інтенсивність плодоношення визначали за 6-ти бальною шкалою, відповідно до якої 0 балів – плодоношення відсутнє; 1 бал інтенсивності плодоношення – наявність близько 20 % від потенціалу; 2 бали – 40 %, 3 бали – 60 %, 4 бали – 80 %, 5 балів – 100 %. Інтенсивність плодоношення визначалася у розрізі фенологічних форм дерев. Визначення фенологічних форм було проведено у попередні роки. Інформація щодо розподілу дерев дуба за фенологічними формами на ділянках клонових плантацій із різною інтенсивністю зрідження відображена у таблиці 1.

---

[14] Нейко І. С., Мудрак Г. В., Нейко О. В., Дідур І. М., Матусяк М. В., Козак Ю. В. Лісові генетичні ресурси у контексті збереження біорізноманіття Вінниччини : монографія. Вінниця : ТВОРИ, 2022. 500 с.

[15] Нейко І. С., Оплаканська А.Б, Панкова С. О. Особливості функціонування лісонасіннєвих плантацій дуба звичайного (*Quercus robur, L.*) в умовах Правобережного Лісостепу України. *Аграрні інновації*. 2024. Вип. 25. С. 129–133.

Рис. 1. Ділянка 5 (клонова насіннєва плантація дуба звичайного без зрідження)

Рис. 2. Ділянка 6 (клонова насіннєві плантації дуба звичайного із середньою інтенсивністю зрідження (видалено через один ряд)

Таблиця 1

Розподіл дерев дуба звичайного за фенологічними формами на КНП (ДП «Вінницька ЛНДС», Турбівське лісництво, ділянки 5, 6, 7)

Форма	Розподіл клонів за ділянками, %		
	5	**6**	**7**
Рання (Р)	2	7	14
Рання проміжна (РПр)	5	10	11
Проміжна (Пр)	26	21	25
Пізня проміжна (ППр)	32	40	28
Пізня (П)	35	22	22
Всього	100	100	100

Дані щодо інтенсивності плодоношення дуба звичайного на клонових плантаціях № 5, 6, 7 відображена у таблиці 2.

Таблиця 2

Інтенсивність плодоношення дуба звичайного на ділянках селекційного комплексу № 5, 6, 7 у 2025-му році

Ділянка	Інтенсивність плодоношення					
	Кількість дерев, шт.	**Середній бал**	***max***	***min***	**Стандартне відхилення**	**Дисперсія**
5	386	0,6	3	0	0,69	0,48
6	181	1,2	4	0	0,96	0,93
7	109	2,6	4	1	0,92	0,83
Загальний підсумок	676	1,1	4	0	1,09	1,18

За даними таблиці, на усіх плантаціях наявно 676 дерев. Найбільша кількість дерев зосереджена на ділянці № 5 (без зрідження) – 386. На ділянках із середньою (№ 6) та сильною (№ 7) інтенсивністю зрідження кількість дерев становила відповідно 181 та 109. У відсотковому відношенні, частка дерев на ділянці № 5 становить 57 % від початкової кількості, а на ділянках № 6 та № 7 – 27 % та 16 % відповідно.

За результатами проведених польових досліджень наприкінці вегетаційного періоду 2025-го року середній бал плодоношення дерев становив 1. Поряд із цим спостерігалися суттєві відмінності щодо середньої інтенсивності утворення жолудя на окремих ділянках. Зокрема, на ділянці без зрідження середня інтенсивність плодоношення у 2025-му році становила лише 0,6 балів. Водночас, на ділянці із високою інтенсивністю розрідження середній бал утворення жолудя складав 2,6 балів. Тобто, середня інтенсивність на даній ділянці була

вищою у 4 рази у порівнянні із ділянкою без зрідження. Якщо на ділянці із високим ступенем зрідження траплялися дерева із балом плодоношення 4,0 то на ділянці без зрідження такі дерева були відсутні.

Інформація щодо інтенсивності утворення жолудя на клонових плантаціях із різною інтенсивністю розрідження № 5, 6, 7 у 2025-му році у розрізі фенологічних форм наведені у таблиці 3.

Таблиця 3

Інтенсивність плодоношення дуба звичайного на ділянках селекційного комплексу № 5, 6, 7 у 2025-му році у розрізі фенологічних форм

Фенологічна форма	Інтенсивність плодоношення, бал			Стандартне відхилення	Дисперсія
	середнє	*max*	*min*		
Ділянка № 1					
Пізня (П)	0,3	2	0	0,51	0,26
Пізня проміжна (ППр)	0,4	2	0	0,62	0,37
Проміжна (Пр)	0,5	2	0	0,64	0,40
Рання проміжна (РПр)	0,5	2	0	0,62	0,37
Рання (Р)	0,3	1	0	0,50	0,19
Ділянка № 2					
Пізня (П)	0,7	3	0	0,82	0,65
Пізня проміжна (ППр)	1,3	4	0	1,00	0,99
Проміжна (Пр)	1,4	4	0	1,00	0,98
Рання проміжна (РПр)	1,2	3	0	0,94	0,84
Рання (Р)	1,2	2	0	0,80	0,59
Ділянка № 3					
Пізня (П)	2,1	3	1	0,79	0,60
Пізня проміжна (ППр)	3,1	4	1	0,88	0,76
Проміжна (Пр)	2,4	4	1	0,88	0,75
Рання проміжна (РПр)	2,7	4	1	0,98	0,89
Рання (Р)	2,5	4	2	0,64	0,38
Загальний підсумок	1,1	4	0	1,09	1,18

Відповідно до даних, які наведені у таблиці 3 найвищим рівнем утворення жолудя відрізняються проміжні фенологічні форми. Зокрема, найвищим рівнем характеризуються рання проміжна, пізня проміжна, середній бал плодоношення яких становив 0,5–3,1 бали. Поряд із цим, середній бал формування плодоношення для пізньої фенологічної форми складала від 0,3 до 2,1 балів. Це вказує на те, що відмічаються загальні тенденції стосовно вищого рівня плодоношення проміжних фенологічних форм порівняно із пізніми. Для ранньої фенологічної

форми відмічається дещо нижче плодоношення у порівнянні із проміжною фенологічною формою.

Згідно проведених досліджень встановлено, що найвища насіннєва продуктивність була у клонів ранньої проміжної, пізньої проміжної та проміжної фенологічної форми. Водночас для дерев пізньої фенологічної форми було характерним найнижчий рівень плодоношення. Низькі показники щодо насіннєвої продуктивності були у дерев дуба ранніх фенологічних форм.

На ділянці № 5 (без зрідження) максимальна продуктивність була у проміжних та ранніх проміжних фенологічних форм, які характеризувалися середнім балом репродукції 0,5. Найнижчими рівнями плодоношення відрізнялися дерева ранніх та пізніх фенологічних форм (0,3 бали). Проміжні та пізні проміжні фенологічні форми характеризувалися дещо вищими рівнями плодоношення, зокрема на ділянці № 6 (середнього рівня зрідження) – 1,3–1,4 бали. У дерев пізньої фенологічної форми, як і на попередній ділянці, плодоношення було найнижчим у пізніх фенологічних форм та становило у середньому 0,7 бали.

Для ділянки № 7, де було проведено високу інтенсивність вирубування дерев рані проміжні та проміжні фенологічні форми відрізнялися найвищими рівнем плодоношення та становили 2,7–3,1 балів. На даній ділянці найнижчою інтенсивністю плодоношення характеризувалися дерева пізньої фенологічної форми. Інтенсивність плодоношення зазначеної фенологічної форми складав 2,1 балів.

У результаті проведених досліджень необхідно відмітити, що проведення зріджень клонових лісонасіннєвих плантацій є досить ефективним шляхом для підвищення інтенсивності репродукції дуба звичайного. Зазначені методи стимулювання репродуктивних процесів необхідно проводити на загущених плантаціях, які характеризуються змикання крон дерев. Проведення зріджень на плантаціях сприяє зростанню плодоношення у порівнянні із плантаціями без зріджень у 3–4 рази. Ефективність проведених зріджень відмічається уже на 3–4-й рік після їх проведення. Диннаміка плодоношення на клонових насіннєвих плантаціях (Державне підприємство «Вінницька лісова науково-дослідна станція», Турбівське лісництво, ділянки № 5, 6, 7) відображена у таблиці 4, а також на рис. 3.

Аналіз динаміки плодоношення впродовж 2018–2025-го років вказує на загальні тенденції щодо деякого зростання інтенсивності репродуктивних процесів на клонових плантаціях від 1 до 1,5 балів. На ділянці № 5 впродовж останніх 7-ми відмічався найнижчий рівень репродукції, який коливався у межах 0,5–0,8 балів. Найвищі середні значення за інтенсивністю плодоношення відмічалися у 2023-му році.

Таблиця 4

Диннаміка плодоношення на клонових насіннєвих плантаціях (Державне підприємство «Вінницька лісова науково-дослідна станція», Турбівське лісництво, ділянки № 5, 6, 7)

Ділянка №	2018		2022		2023		2024		2025	
	А, бал	*max, бал*	*А, бал*	*max, бал*	*А, бал*	*max, бал*	*А, бал*	max, бал	А, бал	max, бал
5	0,5	4	0,9	4	0,8	4	0,3	4	0,6	3
6	0,6	4	1,7	5	1,6	5	0,8	4	1,2	4
7	1,4	5	1,9	5	3,8	5	1,6	5	2,6	5
Середнє	0,7	5	1,3	5	2,1	5	0,9	4	1,1	4

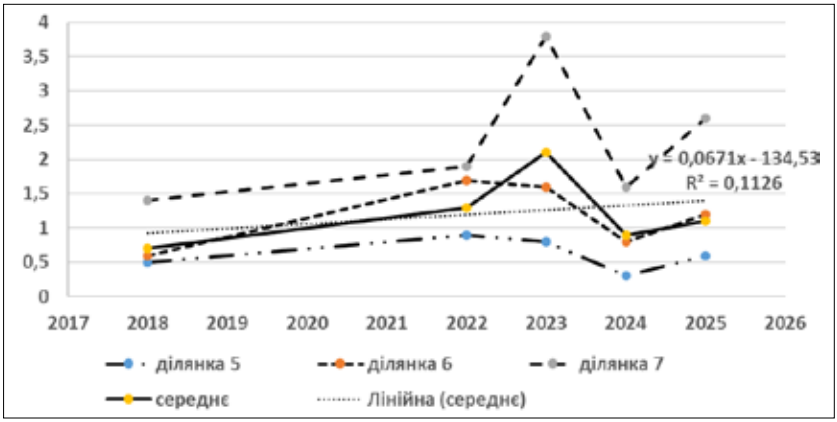


Рис. 3. Динаміка плодоношення на клонових насіннєвих плантаціях різної інтенсивності зрідження (ділянки № 5, 6, 7) впродовж 2018–2025-го років

На ділянці № 6 (із середнім рівнем зрідження) середня інтенсивність утворення жолудя змінювалася від 0,4 до 1,7 балів. Найвищий рівень репродукції було зафіксовано у 2022-му році. Найнижчий рівень плодоношення виявлено у 21018-му році. На ділянці із найвищою інтенсивністю зрідження були відмічені максимальні рівні утворення жолудя впродовж 2018–2025-го років. Так середній бал плодоношення на даній ділянці змінювався від 1,4 до 3,8 балів. Найвищий рівень репродукції було ідентифіковано у 2023-му році – 3,8 балів.

Локалізація ділянок № 5, 6, 7 із різною інтенсивністю зрідження у межах селекційного комплексу ДП «Вінницька лісова науково-дослідна станція» станом на 2025-й рік відображена на рис. 4.

Рис. 4. Загальний вигляд ділянок селекційного комплексу 5, 6, 7 різної інтенсивності зрідження станом на 2025-й рік

2. Сучасний стан та рівень репродукції родинної плантації дугласії Мензіса

Родинна плантація дугласії була створена у 2013-му році у межах селекційного комплексу Державного підприємства «Вінницька лісова науково-дослідна станція» Українського науково-дослідного інституту лісового господарства та агролісомеліорації (УкрНДІЛГА). Плантація була закладена у кварталі 42 (виділ 2) згідно до матеріалів лісовпорядкування 2021-го року.

На площі було висаджено 2-річні сіянці дугласії, які були отримані із лабораторії селекції УкрНДІЛГА. Сіянці були вирощені із насіння, заготовленого на ділянці дослідних культур хвойних інтродуцентів із кращих та нормальних дерев, яка розташована у Південному лісництві (квартал 129, виділ 9).

Для створення плантації було використано 17 родин. У віці 13 років, дугласія почала вперше формувати повноцінні шишки. Збереженість більшості родин від їх початкової кількості у 2023 році становила більше 50,0 %. Найменший відсоток збереженості мали родини № 6-15 (28,6 %) та № 3-1 (41,7 %), найбільший – № 9-3 (77,8 %) та № 6-2 (76,5 %). Середня збереженість родин становила 57,4 %.

На плантації переважали дерева відмінного та доброго стану, їх чисельність становила 43,5 % та 37,7 % відповідно. Найбільшу кількість дерев відмінного стану 50,0 % і більше мали родини № 2-11, суміш, 6-15, 3-16 та 5-19. В родинах № 6-2, 9-3, 5 3-6, 1-5, 3-1, 6-15 переважали дерева доброго стану. Середня кількість дерев задовільного стану становила 15,4 %. Найбільший відсоток дерев задовільного стану мали родини № 1-6 (50,0 %) та № 11-18 (34,8 %), найменший – № 5-1 (7,8 %) та № 4-2 (8,3 %). Дерева незадовільного стану були зафіксовані у родин № 3-6, 5-1, 5-19, 9-1, 11-4 та 1 (суміш), їх чисельність становила 3,4 % від загальної кількості дерев на плантації.

Рис. 5. Насіннєношення псевдотсуги Мензіса у 2025-му році на родинній плантацій ДП «Вінницька ЛНДС», Турбівське лісництво, кв. 42, вид. 5

Розподіл потомства дерев дугласії на родинній плантації (2013-го року створення) за висотою станом на осінь 2025-го року наведений у таблиці 5. Найвищою продуктивністю за висотою (7–8 м) характеризувалися наступні родини: 1-5, 1-6, 3-6, б/н та суміш. Максимальна висота дерев цих потомств становила 8,0–8,5 м. Найнижча продуктивність була у родин 11-4, 8-1, 4р, 8-1 (середня висота – 6,1–6,4). Розподіл потомства дерев дугласії на родинній плантації за станом вказує на переважання 2-ї категорії. Дещо кращим станом відрізнялися потомства: 1-6, 2-11, 4-2. Кращі характеристики за прямизною стовбура були у родин 1-5, 2-11, 5-19 (середній бал за прямизною 1,6-1,8). У 2025-му році дерева відрізнялися низьким рівнем репродукції (середній бал інтенсивності утворення шишок по плантації становив 0,2). У окремих дерев родин 5-1, 11-4, 4-2, рівень репродукції становив 4-5 балів.

Таблиця 5

Розподіл потомства дерев дугласії на родинній плантації (2013-го року створення) за висотою станом на осінь 2025-го року

Родина	К-сть дерев, шт	Характеристика за висотою, м				
		***A*, м**	***min***	***max***	**σ**	**σ^2**
11-4	49	6,1	1,0	8,5	2,3	5,120
13-1	36	6,6	1,0	8,5	1,9	3,319
1-5	50	7,1	4,0	8,5	1,2	1,405
1-6	12	7,7	5,0	8,5	1,2	1,246
2-11	32	6,5	4,0	8,0	1,2	1,279
3-16	36	6,7	4,0	8,5	1,4	1,803
3-6	25	7,0	4,0	8,5	1,4	1,716
4-2	43	6,8	3,0	8,5	1,6	2,542
4р	34	6,4	1,0	8,5	2,2	4,571
5-1	82	6,7	3,0	9,0	1,5	2,336
5-19	84	6,7	1,0	8,5	1,5	2,177
6-2	18	6,8	4,0	8,5	1,6	2,420
8-1	74	6,4	3,0	8,5	1,3	1,756
9-1	31	6,3	3,5	8,0	1,3	1,507
9-3	9	7,2	6,0	8,0	0,8	0,561
б/н	7	8,0	8,0	8,0	0,0	0,000
суміш	40	7,1	3,0	8,5	1,3	1,660
Разом/середнє	662	6,7	1,0	9,0	1,6	2,444

Таблиця 6

Розподіл потомства дерев дугласії на родинній плантації (2013-го року створення) за станом (осінь 2025-го року)

Родина	К-сть дерев, шт	Характеристика за станом, категорія стану				
		***A*, м**	***min***	***max***	**σ**	**σ^2**
1	2	3	4	5	6	7
11-4	49	2,5	1	4	1,1	1,106
13-1	36	1,9	1	4	0,8	0,609
1-5	50	1,8	1	2	0,4	0,184
1-6	12	1,1	1	2	0,4	0,109
2-11	32	1,6	1	3	0,8	0,581
3-16	36	2,1	2	3	0,3	0,090
3-6	25	2,6	2	3	0,5	0,240
4-2	43	1,6	1	2	0,5	0,230
4р	34	2,0	1	4	0,6	0,385
1	2	3	4	5	6	7
5-1	82	2,2	2	4	0,4	0,191
5-19	84	1,9	1	3	0,5	0,275

Продовження таблиці 6

1	2	3	4	5	6	7
6-2	18	2,0	2	2	0,0	0,000
8-1	74	2,0	1	3	0,5	0,244
9-1	31	2,1	1	4	0,6	0,390
9-3	9	1,9	1	2	0,4	0,122
б/н	7	2,0	2	2	0,0	0,000
суміш	40	1,8	1	3	0,6	0,386
Разом/середнє	662	2,0	1	4	0,6	0,400

Таблиця 7

Розподіл потомства дерев дугласії на родинній плантації (2013-го року створення) за прямизною стовбура станом на осінь 2025-го року

Родина	**К-сть дерев, шт**	**Характеристика за прямизною стовбура, бал**				
		***A*, м**	***min***	***max***	**σ**	**σ^2**
11-4	49	2,1	0	3	0,875	0,739
13-1	36	2,4	1	4	0,727	0,496
1-5	50	1,8	1	3	0,755	0,553
1-6	12	2,0	2	2	0,000	0,000
2-11	32	1,6	0	3	0,996	0,934
3-16	36	2,1	2	3	0,224	0,048
3-6	25	2,1	0	3	0,704	0,462
4-2	43	2,2	1	3	0,473	0,214
4р	34	2,3	2	3	0,452	0,197
5-1	82	2,2	1	3	0,496	0,241
5-19	84	1,8	0	3	0,586	0,337
6-2	18	2,3	2	3	0,469	0,204
8-1	74	2,1	1	3	0,400	0,156
9-1	31	2,2	2	4	0,489	0,228
9-3	9	2,0	2	2	0,000	0,000
б/н	7	2,0	2	2	0,000	0,000
суміш	40	2,0	1	3	0,566	0,308
Разом/середнє	662	2,0	0	4	0,605	0,366

Таблиця 8

Розподіл потомства дерев дугласії на родинній плантації (2013-го року створення) за утворенням шишок станом на осінь 2025-го року

Родина	К-сть дерев, шт	Характеристика утворення шишок, бал				
		A, м	*min*	*max*	σ	σ^2
11-4	49	0,5	0	4	0,945	0,893
13-1	36	0,1	0	1	0,242	0,059
1-5	50	0,2	0	3	0,625	0,391
1-6	12	0,0	0	0	0,000	0,000
2-11	32	0,7	0	3	1,273	1,619
3-16	36	0,0	0	0	0,000	0,000
3-6	25	0,2	0	3	0,748	0,560
4-2	43	0,4	0	4	1,098	1,206
4р	34	0,0	0	0	0,000	0,000
5-1	82	0,1	0	5	0,728	0,530
5-19	84	0,2	0	3	0,536	0,287
6-2	18	0,0	0	0	0,000	0,000
8-1	74	0,0	0	0	0,000	0,000
9-1	31	0,2	0	3	0,654	0,428
9-3	9	0,0	0	0	0,000	0,000
б/н	7	0,0	0	0	0,000	0,000
суміш	40	0,1	0	2	0,423	0,179
Разом/середнє	662	0,2	0	5	0,659	0,434

Таблиця 9

Розподіл потомства дерев дугласії на родинній плантації (2013-го року створення) за розвитком крони станом на осінь 2025-го року

Родина	К-сть дерев, шт	Характеристика розвитку крони, бал				
		A, м	*min*	*max*	σ	σ^2
1	2	3	4	5	6	7
11-4	49	2,6	1	5	1,283	1,647
13-1	36	3,2	1	5	0,882	0,777
1-5	50	3,6	2	5	0,881	0,777
1-6	12	4,2	2	5	1,090	1,188
2-11	32	3,4	1	5	1,088	1,183
3-16	36	3,4	1	5	0,973	0,948
3-6	25	3,5	2	5	0,957	0,916
4-2	43	3,6	2	5	1,058	1,120
4р	34	3,3	1	5	1,429	2,043
5-1	82	3,6	1	5	1,037	1,076

Продовження таблиці 9

1	2	3	4	5	6	7
5-19	84	3,4	1	5	1,011	1,023
6-2	18	3,5	1	5	1,402	1,964
8-1	74	3,1	1	5	0,808	0,653
9-1	31	3,1	2	5	0,943	0,890
9-3	9	3,6	3	5	0,728	0,531
б/н	7	5,0	5	5	0,000	0,000
суміш	40	3,4	1	5	1,182	1,398
Разом/середнє	662	3,4	1	5	1,100	1,210

Таблиця 10

Розподіл потомств дерев дугласії на родинній плантації (2013-го року створення) за приростом 1-го року станом на осінь 2025-го року

Родина	**К-сть дерев, шт**	**Характеристика за приростом 1-го року, см**				
		***A*, м**	***min***	***max***	**σ**	**σ^2**
11-4	49	17,7	10	27	4,7	22,147
13-1	36	18,6	11	25	3,7	13,496
1-5	50	19,6	13	27	3,3	11,208
1-6	12	21,3	12	28	4,9	24,438
2-11	32	18,1	12	24	3,3	10,692
3-16	36	18,2	12	25	4,0	15,960
3-6	25	18,6	12	24	3,5	12,507
4-2	43	18,6	13	24	3,3	10,800
4р	34	19,2	12	26	3,9	15,361
5-1	82	18,6	12	30	3,8	14,235
5-19	84	19,1	10	27	3,7	13,461
6-2	18	19,0	12	25	4,5	20,000
8-1	74	17,6	11	27	3,6	12,682
9-1	31	18,1	11	28	3,8	14,590
9-3	9	18,6	15	22	2,2	4,816
б/н	7	23,5	23	24	0,5	0,250
суміш	40	19,3	12	25	3,3	10,735
Разом/середнє	662	18,7	10	30	3,8	14,559

Таблиця 11

Розподіл потомств дерев дугласії на родинній плантації (2013-го року створення) за приростом 2-го року станом на осінь 2025-го року

Родина	К-сть дерев, шт	Характеристика за приростом 2-го року, см				
		A, м	min	max	σ	σ^2
11-4	49	15,6	10	22	3,110	9,673
13-1	36	16,5	10	20	2,550	6,500
1-5	50	16,4	10	20	2,412	5,820
1-6	12	16,4	13	20	2,176	4,734
2-11	32	16,5	11	20	2,172	4,720
3-16	36	15,2	10	18	2,372	5,628
3-6	25	16,8	11	22	2,880	8,293
4-2	43	16,2	12	22	3,212	10,320
4р	34	16,3	10	22	3,083	9,504
5-1	82	15,9	11	25	2,811	7,902
5-19	84	16,2	10	20	2,492	6,211
6-2	18	15,9	11	21	2,658	7,066
8-1	74	15,5	11	22	2,510	6,299
9-1	31	16,3	12	21	2,147	4,610
9-3	9	16,0	12	19	2,138	4,571
б/н	7	19,5	18	21	1,500	2,250
суміш	40	16,4	11	22	2,604	6,783
Разом/середнє	662	16,1	10	25	2,691	7,243

Середній бал розвитку крони становив 3,0, що вказує на переважання дерев із добре розвиненими кронами. Найбільшими параметрами крон відрізнялися родини: 1-5, 1-6, 4-2, 5-1, 9-3, б/н (бал 3,6–5,0). Середній приріст пагонів останнього року становив близько 19,0 см. Найвищі прирости останнього року були зафіксовані у родин: 1-6, 1-5, суміш (19,3–23,5 см). Значно нижчі прирости останнього року були у дерев родин 11-4, 8-1. Прирости минулого року були найвищими у потомств 1-5, 1-6, 13-1, 2-11, б/н, суміш (16,4–19,5 см).

3. Особливості репродукції сортів фундука української селекції

Репродуктиві властивості рослин виду *Corylus* відмічається у різному віці. Поряд із цим, виведені сорти фундука характеризуються більш раннім плодоношенням. Якщо цвітіння у більшості видів *Corylus* відмічається кожного року, проте значний урожай горіхів повторюється лише із певною періодичністю[16, 17, 18].

Початок цвітіння більшості рослин *Corylus* відмічається ще до переходу температури повітря через 5 °С, що є характерним для початку вегетаційного періоду. Саме ці терміни є початком вегетації більшої кількості видів основних деревних порід у помірній зоні. Для різних фаз формування квітконосів у виду є потреба щодо різного температурного режиму. Зокрема, для початку цвітіння необхідне підвищення температури, тоді як для розвитку квіткових бруньок є необхідність щодо наявного певного періоду понижених температур[19, 20, 21].

Термінами формування тичинкових суцвіть для більшості видів *Corylus* в умовах Степу та Лісостепу України є перша половина березня, коли середня добова температура повітря перевищує 3 °С. Репродуктивні процеси, зокрема формування горіхів та інтенсивність їх утворення є ключовими. Це зумовлено тим, що селекція фундука спрямована саме на отримання максимальної урожайності та забезпечення відповідної якості плодів. Поряд із цим інтенсивність плодоношення зумовлена не лише генетичним властивостями сортів, але й погодно-кліматичними умовами, які формуються впродовж року.

Дослідження щодо стану та репродуктивних процесів проведено в умовах дендропарку ХНАУ ім. В. В. Докучаєва. Зокрема, досліджено

---

[16] Колчанова О. В., Лось С. А., Ситнік І. Й. Особливості росту й розвитку ліщини деревоподібної (*Corylus colurna L.*) у насадженнях зеленої зони ХНАУ ім. В. В. Докучаєва. *Лісівництво і агролісомеліорація*. 2018. Вип. 132. С. 66–72.

[17] Колчанова О. В., Лось С. А. Мінливість морфологічних ознак сережок сортів фундука української селекції. *Лісівництво і агролісомеліорація*. 2014. № 125. С. 115–120.

[18] Нейко О. В. Сучасний стан та ефективність використання ліщини деревовидної (*Corylus colurna L.*) в умовах Поділля. Матеріали міжнародної науково-практичної конференції «*Edukacja i nauka leśna: stan, problemy i perspektywy rozwoju». Tom. 3. Łomża – Małyn.* 36–40.

[19] Колчанова О. В., Лось С. А., Ситнік І. Й. Особливості росту й розвитку ліщини деревоподібної (*Corylus colurna L.*) у насадженнях зеленої зони ХНАУ ім. В. В. Докучаєва. *Лісівництво і агролісомеліорація*. 2018. Вип. 132. С. 66–72.

[20] Колчанова О.В, Лось С. А., Халімон Є. В., Білик О. М. Ліщина деревовидна у парках Полтавщини. *Інтродукція рослин, збереження та збагачення в ботанічних садах та дендропарках* : Міжнародна науково-практична конференція. Київ. С. 120–121.

[21] Колчанова О. В., Лось С. А. Мінливість морфологічних ознак сережок сортів фундука української селекції. *Лісівництво і агролісомеліорація*. 2014. № 125. С. 115–120.

інтенсивність плодоношення 12-ти сортів фундука української селекції[22, 23].

БОРОВСЬКИЙ – належить до сорту, для якого характерні середні розміри листкової пластинки, яка за довжиною становить близько 10–11 см, а за шириною – 10–11 см. Сорт характеризується коротким черешком, довжина якого становить 1–2 см. Коефіцієнт форми становить до 1,0, що вказує на більш виражену заокруглену форму листкової пластинки. Листкові пластини переважно правильної форми, округлі. Верхівка листка здебільшого широка та має загострений кінчик. Основа листкової пластинки здебільшого серцеподібна. У сорту достатньо виражені зубці першого порядку. Листкові пластини із зубцями 2-го порядку, які є середньо вираженими та зубці 3-го порядку, які є слабо-виражені. Довжина сережок у середньому становить близько 3,0 см. Форма лусочок сережок є вузько-заокругленою. Кінчик лусочки за формою є видовженим, а край лусочки – прямим. Лусочки здебільшого є густо-опушеними.

ВЕЛЕТЕНЬ – сорт, що відрізняється достатньо великими параметрами листкових пластин, довжина якої становить 11–13 см, а ширина – 9–10 см. Довжина черешка складає 1,5–2 см. Для даного сорту є характерна видовженість листка. Листкові пластини здебільшого правильної, округлої форми. Для листка властива широка загострена верхівка. Листкова пластина із серцеподібною основою. Листки із зубцями 1-го порядку, які переважно є слабо вираженими. Середньо вираженими є зубці 2-го та 3-го порядку. Характеризується середньою довжиною сережок – 3,5 см. Сережки за формою лусочок вузько-заокруглені. Форма кінчика лусочки – видовжена, краю лусочки – викривлена. Лусочки середньо-опушені.

ДОХІДНИЙ – сорт, який відрізняється значними розмірами листка як за довжиною – 10–13 см так і шириною – 8–11 см. Сорт характеризується достатньо довгим черешком – 2–2,5 см. Є властивою деяка витягнутість листка. Верхівка у листка широко загострена. Серцеподібна листкова пластина. Є достатньо вираженими зубці першого порядку. Середню вираженість мають зубці 2-го порядку, а зубці 3-го порядку здебільшого слабо-виражені. Сорт характеризується середньою довжиною сережок – 4,2 см. Форма лусочок сережок – вузько-загострені. Форма краю

[22] Колчанова О. В., Лось С. А. Методичні аспекти вивчення формового різноманіття ліщин на прикладі сортів фундука української селекції. *Лісівництво і агролісомеліорація*. 2018. № 133. С. 10–19.

[23] Ситнік І. Й. Парки Харківського національного аграрного університету ім. В. В. Докучаєва. Харків. нац. аграр. ун-т ім. В. В. Докучаєва. Вид. 2-ге, допов. і перероб. Харків, 2017. 224 с.

лусочки є викривленою, а кінчика лусочки – трикутною. Опушеність лусочки середня.

КЛИНОВИДНИЙ – сорт, який відрізняється достатньо великими параметрами листкової пластинки, довжина якої становить 11–13 см, а ширина – 9–10 см. У листка короткий черешок, довжина якого становить 1–1,5 см. Для листкової пластинки є характерним найменший коефіцієнт форми, що відображає витягнутість листка. Листкова пластина овальної, правильної форми. Відмічається широка загостреність верхівки. Для основи листка властива серцеподібна форма. Слабо вираженими є зубці 1-го і 2-го порядків. Також слабо вираженими є зубці і 3-го порядку. Довжина сережок у середньому становить 2,8 см. Форма лусочок сережок – трикутна. Кінчики лусочок мають тупо-загострену форму, а краю лусочки – дещо викривлену. Опушеність лусочок слабка.

КРАСНОЛИСТИЙ – сорт, для якого властиві середні розміри листка, довжина якого у середньому становить 11–12 см, а ширина – 9–11 см. Листки мають характерний червонуватий колір. Довжина черешка становить 1–1,5 см). Листкова пластина характеризується деякою витягнутістю. Для листка властива більш виражена правильна, округла форма. Широко загостреною є верхівка листка. У основі листкової пластини вушко-подібна форма. Середньо вираженими є зубці 1-го, 2-го і 3-го порядків. Довжина сережок у середньому становить 3,2 см. Форма лусочок сережок – трикутна. Кінчик лусочки трикутний, а краю – викривлений. Опушеність лусочок майже відсутня.

ЛОЗІВСЬКИЙ БУЛАВОВИДНИЙ – сорт, листова пластина якого відрізняється порівняно невеликими розмірами листкової пластини, довжина якої становить 9–10 см, а ширина – 7–9 см. Довжина черешка незначна – 1–1,3 см. Листок характеризується незначною витягнутістю пластини. Листкова пластина є розширеною у нижній частині та має яйцеподібну форму. Верхівка відрізняється середньою шириною та є загостреною. Серцеподібною є основа листка. Виражені зубці 1-го порядку, а зубці 2-го порядку здебільшого є середньо вираженими, а 3-го порядку – слабо вираженими. Довжина сережок у складає – 2,6 см. Форма лусочок сережок – широко-округла. Кінчик лусочки видожений, край лусочки викривлений. Опушеність лусочок середня.

ЛОЗІВСЬКИЙ ШАРОВИДНИЙ – сорт, для якого характерні середні розміри листкової пластинки, довжина яких становить 9–11 см. Така ж ширина листка, яка складає 9–11 см. У листка переважно короткий черешок довжиною 1-1,5 см. Значення коефіцієнту форми близьке до 1,0, що відображає заокругленість форми пластини. Листкова пластинка розширена у верхній частині та за формою є зворотно-яйцеподібною.

Верхівка листкової пластинки – широко загострена. Вушко подібною є основа листка. Вираженими є зубці 1-го порядку, а також зубці 2-го порядку. Зубці 3-го порядку є слабо вираженими. Довжина сережок у середньому становить 2,9 см. Форма сережок лусочок широко-округла. У лусочок відсутній кінчик. Прямою є форма краю. Лусочки є густо опушеними.

ОЛІМПІЙСЬКИЙ – сорт, якому властиві середні розміри довжини – 12–13 см листкової пластинки та значна ширина – 9–11 см. Переважно середня довжина черешка – 1,5–2 см. Листкова пластинка відрізняється деякою витягнутістю. Форма листка правильної овальної. Верхівка листкової пластинки переважно є звуженою та загостреною. Форма основи листка – серцеподібна. Слабо вираженими є зубці 1-го порядку, а зубці 2-го та 3-го порядків – середньо вираженими. Довжина сережок у середньому становить – 2,5 см. Форма лусочок сережок – вузько загострена. Кінчик лусочки за формою – трикутний, краю лусочки – викривлений. Опушеність лусочок середня.

ПІРОЖОК – сорт, якому властиві листкові пластини значної довжини – 11–13 см, та незначна ширина – 8–10 см. Для черешка характерна середня довжина – 1,5–2 см. Листкова пластина відрізняється найменшим значенням коефіцієнту форми, що відображає на значну її витягнутість. Для листка властива правильна овальна форма. Верхівка переважно середньої ширини та у більшості випадків є загостреною. Серцеподібна основа листка. Для зубців 1-го та 2-го порядків – властива середня вираженість, а для 3-го порядку – слабка вираженість. Сережки довжиною близько – 3,5 см. Форма лусочок сережок трикутна. Кінчик має тупо-загострену форму, а край лусочки майже прямий. Опушеність лусочок слабка.

ПРЕВОСХОДНИЙ-2 – сорт, для якого властиві великі розміри листкової пластинки за довжиною – 11–14 см та шириною – 10–13 см. У листків короткий черешок, довжиною 1–1,5 см. Листкова пластина має незначну витягнутість. Форма листка зворотно-яйцеподібна із розширенням у нижній частині. Широка та загострена верхівка. Ниркоподібною є основа листкової пластинки. Слабо вираженими є зубці 1-го і 3-го порядків, а зубці 2-го порядку – середньо вираженими. Довжина сережок у середньому складає 2,9 см. Форма лусочок сережок вузько заокруглена. Кінчик лусочки за формою видовжений, а краю лусочки – майже прямий. Опушеність лусочок – слабка.

СЕРЕБРИСТИЙ – сорт, який відрізняється порівняно великими розмірами листків за довжиною – 12–14 см та шириною – 11–15 см. Листок із порівняно довгими черешком – 1,5–2 см. Значення

коефіцієнту форми близько 1,0, що відображає відносно заокруглену форму листка. Листкова пластина має широко округлу форму. Верхівка характеризується значною шириною та має загострений кінчик. Форма основи листка – ниркоподібна. Середньо вираженими є зубці 1-го та 2-го порядків. Слабо виражені листки 3-го порядку. Довжина сережок у середньому становить 3,6 см. Кількість сережок у суцвітті здебільшого 3 шт. Сережки довжиною близько 3,6 см. Форма лусочок сережок широко-округла, а кінчик у лусочок відсутній. Край лусочок сережок прямий. Опушеність – густа.

ХАРКІВ-4 – сорт, якому властиві середні розміри листкової пластинки, довжина яких становить від 10 до 12 см, а ширина – від 8 до 10 см. Сорт характеризується відносно довгим черешком, який становить 1,5–2 см. У листкової пластини спостерігається деяка видовженість. Листкова пластина переважно правильної, дещо овальної форми. Верхівка листкової пластини має середню ширину та є загостреною. Основа листка має серцеподібну форму. Середньо вираженими є зубці 1-го та 2-го порядків. Зубці 3-го порядку – слабо виражені. Сорт характеризується середньою довжиною сережок – 2,9 см. У суцвітті переважно по 3 шт. сережок. Основною формою лусочок сережок є трикутна, а форма кінчика – стрілоподібна. Лусочки майже не опушені.

Інтенсивність плодоношення нами визначено у балах (від 0 до 5-ти). Найвищу інтенсивність плодоношення оцінювали у 5 балів, а найнижчу – 1 бал. Відсутність плодоношення була оцінена у 0 балів. Нижче наводиться характеристика сортів за наявними та доповненими дескрипторами на основі проведених досліджень.

У таблиці 12 наведені дані стосовно інтенсивності плодоношення сортів фундука української селекції.

За даними таблиці 12 середня інтенсивність плодоношення сортів становила 2,5 балів що відповідає чисельності 10-16 горіхів на один метр гілки, або 6,2–11,1 ц/га. Найвища продуктивність була відмічена у сорту «Краснолистий». Середній бал плодоношення зазначеного сорту становив 5,0 балів, що відповідає наявності 30-ти і більше горіхів на 1 м, або 10,0 ц/га. Достатньо високою продуктивністю відрізнявся також сорт «Харків-4» – 4,0 бали (7,1–10,0 ц/га). Середньою інтенсивністю плодоношення характеризувалися сорти «Боровський», «Лозівський шаровидний» та «Велетень» – 3,0 бали (4,1–7,0 ц/га). Низька продуктивність за утворенням горіхів була у сортів «Дохідний», «Клиновидний», «Лозівський булавовидний» та «Превосходний-2» – 2,0 бали (2,1–4,0 ц/га). Найнижчою репродуктивною здатністю відрізнялися сорти ’Олімпійський’ та «Пірожок» – 1,0 бал (0,6–2,0 ц/га).

Таблиця 12

Середня інтенсивність плодоношення сортів фундука української селекції (Павленко) в умовах дендропарку ХНАУ

№ п/п	Сорт	Плодоношення, бал	К-сть горіхів на 1 м гілки	Врожайність горіхів ц/га
1	Дохідний	2,0	6–12	2,1–4,0
2	Боровський	3,0	13–20	4,1–7,0
3	Лозівський шаровидний	3,0	13–20	4,1–7,0
4	Харків-4	4,0	21–30	7,1–10,0
5	Клиновидний	2,0	6–12	2,1–4,0
6	Олімпійський	1,0	2–5	0,6–2,0
7	Пірожок	1,0	2–5	0,6–2,0
8	Краснолистий	5,0	30<	10,0
9	Серебристий	2,0	6–12	2,1–4,0
10	Велетень	3,0	13–20	4,1–7,0
11	Лозівський булавовидний	2,0	6–12	2,1–4,0
12	Превосходний-2	2,0	6–12	2,1–4,0
Середнє		2,5	10-16	6,2–11,1

Слід заначити, що оцінювання репродуктивних процесів сортів фундука повинно здійснюватися регулярно, так як різні сорти по-різному реагують на погодно-кліматичні умови. У цьому контексті є важливим визначення особливостей формування репродуктивних органів за умов різного температурного режиму та опадів, які спостерігаються впродовж усього вегетаційного періоду. Важливим аспектом також є наявність чи відсутність ранньовесняних заморозків, які можуть суттєво вплинути на формування репродуктивних органів у цей період.

ВИСНОВКИ

Інтенсивність плодоношення дуба звичайного на клонових насіннєвих плантаціях 1977–1978 років створення різних режимів зрідження (ділянки № 5, 6, 7) в умовах Вінниччини у 2025-му році була низькою та становила 1,1 бали. Якщо на ділянці без зрідження середній бал плодоношення становив 0,6 то на ділянці 7 (із високою інтенсивністю зрідження) – 2,6 бали. На ділянці із високим ступенем зрідження також відмічено дерева із максимальним рівнем плодоношення – 4 бали. Водночас, дерева із повністю відсутнім плодоношенням на даній ділянці були відсутніми. Найвищим рівнем плодоношення характеризувалися поміжні фенологічні форми, зокрема, рання проміжна, пізня проміжна, середній бал плодоношення яких становив 0,5–3,1 бали. У той же час, інтенсивність плодоношення пізніх фенологічних форм складала 0,3–2,1 бали.

На ділянці клонових насіннєвих плантаціях 1977–1978 років створення без зрідження (ділянка № 5) максимальною продуктивністю характеризувалися проміжні та ранні проміжні фенологічні форми, середня інтенсивність плодоношення яких скала 0,5 бали. Найнижчі рівні репродукції були у пізніх та ранніх феноформ (0,3 бали). Пізні проміжні та проміжні фенологічні форми відрізнялися вищими рівнями репродукції на ділянці із середнім рівнем зрідження (ділянка 6) – 1,3–1,4 бали. Як і на попередній ділянці, інтенсивність репродукції була найнижчою у пізніх фенологічних форм (середній бал – 0,7).

За результатами проведених досліджень у 2025-му році на родинній плантації дугласії 2013-го року, закладеній в умовах Вінниччини встановлено: найвищою продуктивністю за висотою (7–8 м) характеризувалися родини: 1-5, 1-6, 3-6, б/н та суміш; дерева перебували у доброму стані (переважаюча категорія стану – 2,0), дещо кращим станом відрізнялися потомства: 1-6, 2-11, 4-2; кращі характеристики за прямизною стовбура були у родин 1-5, 2-11, 5-19; виявлено низький рівень репродукції (середній бал інтенсивності утворення шишок по плантації становив 0,2), проте у окремих дерев родин 5-1, 11-4, 4-2, рівень репродукції становив 4–5 балів.

Репродуктивна здатність сортів фундука української селекції залежить від ряду чинників, які зумовлені як їх біолого-екологічними особливостями так і умовами зовнішнього середовища. Найвищою репродуктивною здатністю в умовах Харківщини характеризувалися сорти «Краснолистий» (5 балів, або 10,0 ц/га) та «Харків-4» (4 бали, або 7,1–10,0 ц/га). Високим рівнем урожайності відрізнялися також сорти «Боровський», «Лозівський шаровидний» та «Велетень» (3,0 бали, або 4,1–7,0 ц/га). Зазначені сорти можуть успішно використовуватися для створення плантацій горіхоплідних в умовах Лісостепу.

АНОТАЦІЯ

У роботі досліджено сучасний стан, репродуктивну здатність та продуктивність основних лісотвірних порід і горіхоплідних культур в умовах Лісостепу України в контексті посилення кліматичних та антропогенних впливів. Актуальною проблематикою дослідження є зниження біологічної стійкості насаджень, деградація лісових генетичних ресурсів та недостатня ефективність природного й штучного насіннєвого відтворення. На основі багаторічних спостережень на клонових насіннєвих плантаціях дуба звичайного встановлено, що інтенсивність зрідження суттєво впливає на рівень плодоношення, який за умов сильного зрідження зростає у 3–4 рази порівняно

з незрідженими ділянками. Виявлено перевагу проміжних і пізніх проміжних фенологічних форм дуба за насіннєвою продуктивністю, тоді як пізні форми характеризуються найнижчим рівнем репродукції. Дослідження родинної плантації дугласії Мензіса показали переважання дерев доброго та відмінного стану, достатньо високі показники росту і розвитку крони, але загалом низьку інтенсивність формування шишок у молодому віці. Встановлено значну міжродинну мінливість за висотою, приростом, прямизною стовбура та репродуктивними показниками, що свідчить про перспективність селекційного добору.

Аналіз репродуктивних процесів сортів фундука української селекції підтвердив залежність інтенсивності плодоношення від температурного режиму та погодних умов вегетаційного періоду. Виявлено морфологічні та фенологічні особливості сортів, які можуть бути використані як діагностичні ознаки у селекційній роботі. Отримані результати засвідчують необхідність адаптивного підходу до ведення лісового насінництва та вирощування горіхоплідних культур у змінних кліматичних умовах. Практична цінність роботи полягає у можливості застосування результатів для оптимізації режимів догляду за насіннєвими плантаціями, підвищення їх репродуктивної ефективності та збереження генетичного потенціалу лісових екосистем Лісостепу.

Література

1. Данчук О. Т. Лісонасінна база в Україні: сучасний стан та шляхи розвитку. *Наукові праці Лісівничої академії наук України*. 2017. Вип. 15. С. 45–53.

2. Колчанова О. В., Лось С. А., Ситнік І. Й. Особливості росту й розвитку ліщини деревоподібної (*Corylus colurna L.*) у насадженнях зеленої зони ХНАУ ім. В. В. Докучаєва. *Лісівництво і агролісомеліорація*. 2018. Вип. 132. С. 66–72.

3. *Колчанова О.В, Лось С. А., Халімон Є. В., Білик О. М. Ліщина деревовидна у парках Полтавщини. Інтродукція рослин, збереження та збагачення в ботанічних садах та дендропарках* : Міжнародна науково-практична конференція. Київ. 120–121.

4. Колчанова О. В., Лось С. А. Методичні аспекти вивчення формового різноманіття ліщин на прикладі сортів фундука української селекції. *Лісівництво і агролісомеліорація*. 2018. № 133. С. 10–19.

5. Колчанова О. В., Лось С. А. Мінливість морфологічних ознак сережок сортів фундука української селекції. *Лісівництво і агролісомеліорація*. 2014. № 125. С. 115–120.

6. Настанови з лісового насінництва (2-е видання, доповнене і перероблене) / УкрНДІЛГА. Харків, 2017. 107 с.

7. Нейко І. С., Матусяк М. В., Нейко О. В. Вплив кліматичних змін на стан та репродуктивні процеси сосни звичайної фінського походження. *Сільське господарство та лісівництво*. 2023. Вип. 1 (28). С. 137–161.

8. Нейко І. С., Матусяк М. Ф., Разанов С. Ф., Разанова А. М., Мудрак Г. В. Репродуктивні процеси на клонових плантаціях ялини європейської фінського походження в контексті сталого лісового господарства. *Сільське господарство та лісівництво*. 2025. Вип. 1 (36). С. 132–146.

9. Нейко І. С., Мудрак Г. В., Нейко О. В., Дідур І. М., Матусяк М. В., Козак Ю. В. Лісові генетичні ресурси у контексті збереження біорізноманіття Вінниччини : монографія. Вінниця : ТВОРИ, 2022. 500 с.

10. Нейко І. С., Оплаканська А.Б, Панкова С. О. Особливості функціонування лісонасіннєвих плантацій дуба звичайного (*Quercus robur, L.*) в умовах Правобережного Лісостепу України. *Аграрні інновації*. 2024. Вип. 25. С. 129–133.

11. Нейко І. С., Юрків З. М. Адаптивна здатність та особливості утворення репродуктивних органів сосни звичайної (*Pinus sylvestris L.*) фінського походження на клоновій плантації в умовах Вінниччини. *Вісник Житомирського національного агроекологічного університету*. 2017. № 1 (58). Т. 1. С. 120–127.

12. Нейко О. В. Сучасний стан та ефективність використання ліщини деревовидної (*Corylus colurna L.*) в умовах Поділля. Матеріали міжнародної науково-практичної конференції "*Edukacja i nauka leśna: stan, problemy i perspektywy rozwoju". Tom. 3. Łomża –-Małyn.* 36–40.

13. Ситнік І. Й. Парки Харківського національного аграрного університету ім. В. В. Докучаєва. Харків. нац. аграр. ун-т ім. В. В. Докучаєва. Вид. 2-ге, допов. і перероб. Харків, 2017. 224 с.

14. Юрків З. М., Блистів В. І., Нейко О. В., Гула Л. О. Питання теорії та практики інтродукції деревних видів. *Стале ведення лісового господарства в умовах кліматичних змін: від досліджень до практики* : Міжнародна науково-практична конференція з нагоди 100-річчя ВП НУБіП України «Боярська лісова науково-дослідна станція». Боярка. 2025. С. 355–359.

15. Юрків З. М., Матусяк М. В., Циганська О. І., Амонс С. Е. Репродуктивний потенціал та характеристика репродуктивної здатності сосни звичайної (*Pinus silvestris L.*) фінського походження на клоновій плантації в умовах Вінниччини. *Аграрні інновації. Селекція, насінництво*. 2025. Вип. 3. С. 244–254.

16. Юрків З. М., Нейко І. С. Перспективи підвищення продуктивності лісів методами лісової селекції та лісового насінництва. *Сільське господарство та лісівництво*. 2017. № 7. С. 24–32.

17. Neiko I. S., Matusiak M. V., Neiko O. V., Vradii O. I., Alieksieiev O. O. Characteristics of the condition and reproductive processes of trees in a clone plantation of *Pinus sylvestris l.* Finnish origin in the conditions of Lytyn forestry of the Vinnytsky regional forestry. *Сільське господарство і лісівництво*. Вип. 4 (39). С. 15–29.

18. Neyko I., Matusyak M., Neyko O., Tsyhanska O. Variability of pedunculate oak (*Quercus Robur L.*) provenances in central Ukraine. *Bulletin of the Transilvania University of Braşov, Series II: Forestry, Wood Industry, Agricultural Food Engineering*. 2023. Vol. 16 (65). № 2. P. 1–16.

19. Neyko I., Matusiak M., Neyko O. Forest genetic resources in situ of broad-leaved species of the right-bank forest-steppe of Ukraine: current state and prospects for using. In Ecology, Biotechnology, Agriculture and Forestry in the 21st century: problems and solutions : Monograph / Edited by S. Stankevych, O. Mandych. Tallinn : Teadmus OÜ, 2024. P. 281–313.

20. Neyko I., Monarkh V., Poznyakova S., Matusyak M. State of in situ forest genetic resources of broadleaved tree species in the Right-bank Forest-Steppe of Ukraine. *Folia Forestalia Polonica, Series A – Forestry*. 2021. Vol. 63 (2). P. 88–96.

Information about the authors:
Neyko Ihor Stepanovych,
Doctor of Agricultural Sciences, Senior Researcher,
SE “Vinnytsia Forest Research Station”
39, Pravednykiv Svitu street, Vinnytsia, 21036, Ukraine

Matusyak Mikhailo Vasylovych,
Candidate of Agricultural Sciences, Associate Professor,
Head of the Department of Forestry and Horticulture,
Vinnytsia National Agrarian University
3, Soniachna street, Vinnytsya, 21008, Ukraine

Neyko Olena Viktorivna,
Junior Researcher,
SE “Vinnytsia Forest Research Station”
39, Pravednykiv Svitu street, Vinnytsia, 21036, Ukraine

CHAPTER 2

СУЧАСНИЙ СТАН ФІТОЦЕНОЗУ ПОЛОНИНИ РІВНОЇ КАРПАТ

Фекета І. Ю.
DOI https://doi.org/10.30525/978-9934-26-654-6-2

ВСТУП

Природні гірські екосистеми полонин становлять виняткову за своєю цінністю складову біорізноманіття. Фітоценотичний покрив полонин налічує близько 835 видів квіткових і вищих спорових рослин, що відповідає приблизно 42 % загального видового складу флори Українських Карпат[1]. Така концентрація видів свідчить про надзвичайно високу природну цінність цих екосистем.

Водночас полонинські біогеоценози є елементами складної, тісно взаємопов'язаної екологічної системи планети. Гірські території відіграють визначальну роль у функціонуванні глобальної екосфери, оскільки забезпечують формування водних ресурсів, підтримують лісові масиви[2]. Полонини відіграють ключову роль у соціально-економічному розвитку карпатських регіонів. Основу традиційного господарського використання цих територій становлять відгінне тваринництво, заготівля сіна, а також землеробство на безлісних ділянках лісового поясу що є важливим для сільськогосподарського виробництва[3, 4].

Разом із тим полонини належать до найбільш уразливих природних комплексів, схильних до прискорених ерозійних процесів, розвитку зсувів, скорочення площ природних оселищ і поступового зниження рівня біорізноманіття.

Усвідомлення глобальної значущості та вразливості гірських екосистем було закріплене ще у 1992 році під час Конференції Організації Об'єднаних Націй з навколишнього середовища і розвитку

[1] Руденко В. П. Географія природо-ресурсного потенціалу України. Чернівці : Чернівецький нац. ун-т., 2010. 552 с.

[2] Малиновський К. А. Крічфалушій В. В. Рослинні угруповання високогір'я Українських Карпат. Ужгород, 2002. 244 с.

[3] Малиновський К. А. Рослинність високогір'я Українських Карпат. Київ : Наук. думка, 1980. 278 с.

[4] Вайнагій І. Йдемо полонину косити? Ужгород : Зелені Карпати, 1995. № 1–2. С. 120–123.

в Ріо-де-Жанейро, де особливу увагу міжнародної спільноти було зосереджено на проблемах сталого розвитку гірських регіонів. Питання «раціонального використання вразливих екосистем і сталого розвитку гірських територій» знайшло своє відображення в програмному документі «Порядок денний на XXI століття»[5].

Сучасні кліматичні зміни у поєднанні з інтенсивним антропогенним навантаженням на гірські ландшафти, зокрема на екосистеми гірського масиву Полонини Рівної (Полонини Руної), становлять серйозну загрозу їхній екологічній стабільності та викликають обґрунтоване занепокоєння щодо збереження їх природного потенціалу.

Природне багатство полонинських ландшафтів у поєднанні з їхнім вагомим господарським потенціалом здавна привертало увагу науковців[6], [7], [8], праці яких зробили вагомий внесок у справу збереження рослинного біорізноманіття України. А саме вивченню екологічних умов, окремих типів рослинних угруповань, біологічних особливостей їх складових, популяційної структури рослин, продуктивності фітоценозів та інших аспектів екології та біології рослин[9].

Водночас значні площі полонин Карпатських гір досі залишаються недостатньо охоронюваними, що сприяє поступовій деградації рослинного покриву.

Збереження флористичного різноманіття в сучасних умовах є однією з ключових екологічних проблем, актуальність якої підкреслюється положеннями міжнародних природоохоронних конвенцій та інших нормативних документів.

---

[5] Порядок денний на XXI століття. URL: https://dev.sd4ua.org/shho-take-stalij-rozvitok/istoriya/

[6] Антропогенні зміни біогеоценотичного покриву в Карпатському регіоні / за ред. М. А. Голубця. Київ : Наук. думка, 1994. С. 17–22.

[7] Брадіс Є. М. Полонини Закарпатської області, їх використання та шляхи поліпшення. Київ : Вид-во АН УРСР, 1951. 68 с.

[8] Горбик В. Н. Рослинність полонин Попадя та Чивчин в Українських Карпатах. *Український ботанічний журнал.* 1967. Т. 26, № 1. С. 22–28.

[9] Малиновський К. А., Крічфалушій В. В. Високогірна рослинність. Київ : Фітосоціоцентр, 2000. Т. 1. 232 с.

1. Фітоценотична різноманітність Полонини Рівної

Упродовж багаторічних досліджень[10, 11, 12] предметом наукового аналізу були природні популяції багаторічних трав'янистих рослин і чагарників, що належать до різних біоморфологічних типів і життєвих стратегій та формують рослинний покрив Полонини Рівної Українських Карпат. Дослідження охоплювали такі види, як чорниця (*Vaccinium myrtillus* L.), біловус стиснутий (*Nardus stricta* L.), костриця червона (*Festuca rubra* L. s. str.), мітлиця тонка (*Agrostis tenuis* Sibth.), щучник дернистий (*Deschampsia caespitosa* (L.) Beauv.) і щавель альпійський (*Rumex alpinus* L.).

Високогірні пасовищні екосистеми Карпат, приурочені до безлісих вершин гірських хребтів. Значні абсолютні висоти над рівнем моря у поєднанні з тривалим антропогенним впливом зумовили відсутність деревної рослинності та сприяли домінуванню трав'янистих фітоценозів.

Згідно з геоботанічним районуванням, територія полонини Руної належить до Ставненсько-Жденівського (Верхньоужоцького) геоботанічного району Карпатського округу букових лісів Центрально-європейської провінції Європейської широколистянолісової області[13].

Рис. 1. Полонина Рівна[14]

---

[10] Фекета І. Ю. Екологічні проблеми фіторізноманіття полонин Українських Карпат. *Вісник Харківського національного університету імені В. Н. Каразіна. Серія: геологія–географія–екологія*. 2011. № 956. Вип. 34. С. 234–238.

[11] Фекета І. Ю., Григорюк І. П., Якубенко Б. Є. Геоботанічна характеристика рослинності полонини Руної Карпат в умовах антропогенної трансформації. *Науковий вісник НУБіП України. Серія: біологія, біотехнології, екологія*. 2011. Вип. 158. С. 19–27.

[12] Фекета І. Ю. Характеристика рослинності полонини-Руни карпат в умовах антропогенної трансформації. *Вісник Львівського університету. Серія географічна.* 2014. Вип. 45. С. 137–143.

[13] Кукурудза С. І. Біогеографія : підручник. Львів : Видавничий центр ЛНУ імені Івана Франка, 2006. 504 с.

[14] Googl map. URL: https://www.google.com/maps/place

Рослинний покрив західної частини Полонинського хребта має чітко виражену висотну поясність. На середніх висотах (приблизно до 900–1100 м н.р.м.) домінують широколистяні букові ліси з домішкою інших деревних порід, які місцями піднімаються майже до межі полонин.

Вище верхньої межі лісу формуються ялинові ліси, подекуди з участю ялиці білої та бука. На вирівняних вершинах і платоподібних ділянках, починаючи з висот 1100–1300 м н.р.м., поширені середньогірські полонини, що належать до субальпійського типу місцевостей. Тут переважають високогірні луки та чагарникові пустища.

Сучасна рослинність полонин має переважно вторинне походження і сформувалася внаслідок тривалого випасу свійських тварин у зоні криволісся, починаючи з XV–XVI ст. Інтенсивне господарське використання призвело до істотного скорочення площ криволісся, зниження верхньої межі лісу на 200–300 м та порушення структури корінних рослинних угруповань. У результаті на значних площах сформувалися вторинні трав'яні лучні формації, які неодноразово ставали об'єктом фітоценотичних досліджень.

Упродовж радянського періоду полонини розглядалися насамперед як кормова база гірського тваринництва[15]. З цією метою впроваджувалися заходи з «оптимізації» рослинного[16] та ґрунтового покриву, включно з розорюванням окремих ділянок, осушенням заболочених місць, знищенням заростей ялівцю та чорниці. Проте вже в другій половині XX ст. стало очевидним провідне екологічне значення аборигенної рослинності полонин і необхідність її збереження, охорони та раціонального, невиснажливого використання.

Полонинський хребет Українських Карпат входить до флористичного району «Східні Бескиди й низькі полонини», який загалом характеризується відносною флористичною одноманітністю[17]. Високогірна флора цієї території є біднішою порівняно з південнішими районами Карпат, що пояснюється історичними особливостями міграцій рослин у між- та післяльодовикові періоди. Водночас тут трапляються окремі східнокарпатські ендеміки, зокрема молочай карпатський

[15] Лазаренко А. С., Мельничук В. М., Малиновський К. А. Поліпшення біловусникових пасовищ субальпійського поясу Карпат. Праці Інституту агробіології АН УРСР. 1953. Вип. 6. С. 47–76.

[16] Бедей М. І. Вплив мінеральних добрив на продуктивність кострицевих лук у субальпійському поясі Карпат. *Український ботанічний журнал.* 1966. Т. 25, № 1. С. 55–61.

[17] Комендар В. І. Лікарські рослини Карпат. Дикорослі та культурні. Ужгород : Мистецька лінія, 2007. 504 с.

(*Euphorbia carpatica*), перестріч Гебіха (*Melampyrum herbichii*) та бузок східнокарпатський (*Syringa josikaea*).

У складі рослинності високогірних лук вище верхньої межі лісу переважають біловусникові угруповання з участю чорниці (*Vaccinium myrtillus*), костриці червоної (*Festuca rubra*), щавелю альпійського (*Rumex alpinus*), мітлиці тонкої (*Agrostis capillaris*) та щучника дернистого (*Deschampsia caespitosa*). Характерною особливістю цієї місцевості є відсутність заростей сосни гірської (*Pinus mugo*), типових для багатьох інших районів Карпат.

У XXI ст. під впливом глобальних кліматичних змін у Карпатах спостерігається перерозподіл сезонних опадів, зростання атмосферної вологості та посилення гідрологічних коливань. У поєднанні з антропогенним впливом, зокрема масштабними вирубками лісу, це сприяє зменшенню видового різноманіття флори, підвищенню ризику катастрофічних паводків і погіршенню ґрунтових умов. Потепління клімату та посилення випаровування сприяють накопиченню солей у верхніх горизонтах ґрунту, зниженню кислотності та погіршенню умов існування типових гірських видів, насамперед чорниці, що призводить до зменшення фітоценотичної стійкості ягідників. Брусниця виявляє дещо вищу стійкість до цих змін.

Провідним типом рослинності в межах досліджуваної території є чорничники, які займають близько 70 % поверхні. Проективне покриття чагарникового ярусу сягає 95 %, з яких 80–85 % припадає на чорницю, а 5–10 % – на брусницю. Місцями у межах чорничників трапляються вкраплення лучних домінантів, зокрема щучника дернистого та куничника очеретяного.

Другим поширеним типом рослинності є високогірні луки, де домінує біловус стиснутий із значною участю щучника дернистого, костриці червоної, куничника очеретяного та мітлиці собачої. Поодиноко трапляються елементи колишнього криволісся, представлені вербою попелястою, вільхою зеленою, горобиною звичайною та ялиною європейською.

Уздовж ґрунтових доріг сформувалася вторинна злаково-лучна рудеральна рослинність, яка займає близько 15 % площі. Тут домінують щучник дернистий, осока заяча, куничник очеретяний та іван-чай. Відносна одноманітність рослинного покриву зумовлює обмежене видове різноманіття тваринного світу цієї території.

Поряд із гірськими лісами трапляються післялісові луки різнотравно-злакового типу, тоді як у верхніх частинах гірського рельєфу сформувалися значні безлісі простори – полонини. Вони являють собою відкриті

лучні комплекси, які в літній період відзначаються високим рівнем флористичного різноманіття та чергуються з чагарниковими заростями сосни гірської (*Pinus montana* Mill.), вільхи зеленої (*Alnus viridis* DC) та ендемічного рододендрона карпатського (*Rhododendron kotschyi* Simk.), відомого серед місцевого населення під назвою альпійської шипшини (*Rosa pendulina* L.).

Формування й розвиток рослинних угруповань гірських полонин визначається поєднанням едафічних і орографічних чинників, зокрема типом ґрунтів, їх фізико-хімічними властивостями, рівнем кислотності, температурним режимом і зволоженням, крутістю та експозицією схилів, площею лучних масивів і тривалістю попередніх лісоутворювальних процесів. Водночас природні популяції досліджуваних видів характеризуються значною екологічною пластичністю та здатністю існувати в широкому спектрі фітоценотичних умов, зосереджених у межах лучних і скельних ценозів субальпійського й альпійського висотних поясів.

Трав'янистий покрив Полонини Руної має чітко виражену мозаїчність: біловусникові угруповання займають понад 65 % площі, тоді як чорничники поширені приблизно на 20 % території.

Активна вегетація розпочинається наприкінці квітня, досягає найвищої інтенсивності наприкінці червня – на початку липня, після чого в другій половині літа (кінець липня – перша половина серпня) спостерігається фаза пригнічення ростових процесів. У вересні відзначається повторне цвітіння окремих осінніх видів, а в другій половині жовтня життєві процеси різко сповільнюються й майже припиняються.

Отже, фітоценотичний покрив Полонини Рівної характеризується високою різноманітністю та складною просторовою структурою, зумовленою поєднанням висотної поясності, едафічних і кліматичних умов, а також тривалим антропогенним впливом. Провідними типами рослинності є чорничники та високогірні луки, представлені переважно біловусниковими угрупованнями, що займають найбільші площі. Сучасна рослинність полонини має здебільшого вторинне походження, сформоване внаслідок багатовікового випасу худоби та господарського використання території. Виявлена мозаїчність рослинного покриву відображає різний ступінь трансформації природних угруповань і їх адаптацію до змінених умов середовища. Кліматичні зміни останніх десятиліть у поєднанні з антропогенним навантаженням негативно впливають на фітоценотичну стійкість, зокрема ягідних угруповань. У цілому фітоценози Полонини Рівної потребують подальшого комплексного вивчення та науково обґрунтованих заходів збереження й раціонального використання.

2. Вплив абіотичних чинників середовища на формування флори Полонина Рівна

Загальновідомо, що значний вплив на формування сучасного стану фітоценозів екосистем мають абіотичні чинники середовища: рельєф, клімат, едафічні умови.

Найбільші за площею полонини зосереджені в східній частині Карпат, де гірські хребти досягають максимальних висот. У західному напрямку, зі зменшенням абсолютних висот, площі полонин поступово скорочуються.

Рельєф. Полонина Рівна є одним із найбільших високогірних масивів Українських Карпат і розташована в північно-західній частині Полонинського хребта, у межах вододілів верхів'їв річок Люта, Шипіт, Турица, Прелучний та Воєводин. Масив має форму широкого, відносно вирівняного плато, значна частина якого вкрита полонинами. Рельєф характеризується різким зниженням у північному та східному напрямах. За більшістю географічних оцінок, Полонина Рівна є найбільшою полониною Українських Карпат і займає площу близько 1100 га.

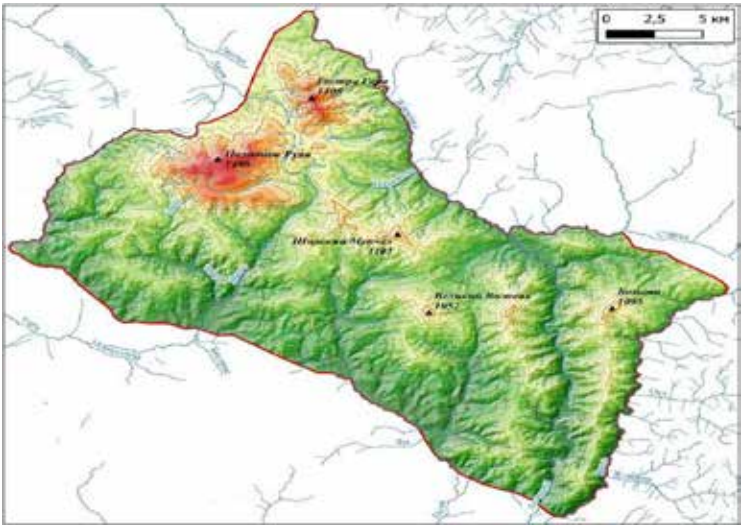


Рис. 2. Рельєф полонини Рівна[18]

[18] Теслович М., Кричевська Д., Брусак В. Морфодинамічний аналіз рельєфу південно-східної частини полонини Рівної методами гіс-моделюваннядля природоохоронних потреб. *Проблеми геоморфології і палеогеографії.* 2022. Вип. 1 (14). С. 128–146. DOI 10.30970/gpc.2022.1.3857

У межах масиву виділяється кілька вершин, найвищою з яких є Полонина Рівна. Дані щодо абсолютної висоти вершини варіюють у різних джерелах і коливаються від 1479 до 1487 м над рівнем моря, тоді як сучасні супутникові вимірювання фіксують максимальні позначки близько 1474 м н.р.м.

Центральна частина масиву характеризується найбільшими висотами, які сягають близько 1480 м над рівнем моря. У північному та південному напрямах поверхня масиву знижується ступінчасто. Південні схили сильно розчленовані мережею водотоків, що формують видовжені відроги, тоді як північні відзначаються більшою крутістю.

Вершинна поверхня має вирівняний характер, часто вкрита кам'янистими розсипищами, що й зумовило відповідну топоніміку. Територія полонини входить до складу ландшафтного заказника «Соколові Скелі».

Клімат як багаторічний режим погодних умов є однією з важливих характеристик, що визначає формування рослинного покриву. Клімат полонини Руної формується внаслідок взаємодії сонячної радіації, атмосферної циркуляції та особливостей підстильної поверхні. Провідну роль у його формуванні відіграє орографія, оскільки гірський масив змінює напрям і швидкість переміщення повітряних мас, трансформуючи їхні температурні та вологісні характеристики.

Напрям і характер вітрового режиму значною мірою залежать від орієнтації хребтів і річкових долин. Для полонини Руної типовими є гірсько-долинні вітри з чітко вираженою добовою періодичністю, особливо в теплу пору року. Періодично спостерігаються фени – сухі й теплі повітряні потоки, що виникають внаслідок підйому, охолодження та подальшого спуску повітряних мас по схилах гір. Загалом швидкість вітру тут помірна, що пов'язано зі значною розчленованістю рельєфу. На полонині Рівна встановлена приватна метеостанція, яка здійснює моніторинг напряму, швидкості та поривів вітру[19].

Гірський рельєф істотно впливає на розподіл атмосферних опадів. Завдяки орографічному ефекту й сегментації циклонів над Полониною Рівною випадає значна кількість вологи. Повітряні маси, що надходять переважно із західного та південно-західного напрямків, втрачають тут основну частину опадів, забезпечуючи підвищену зволоженість території.

[19] Метеопост. Приватна метеостанція у Полонині Руні. URL: https://meteopost.com/ua/mstation/runa/#google_vignette

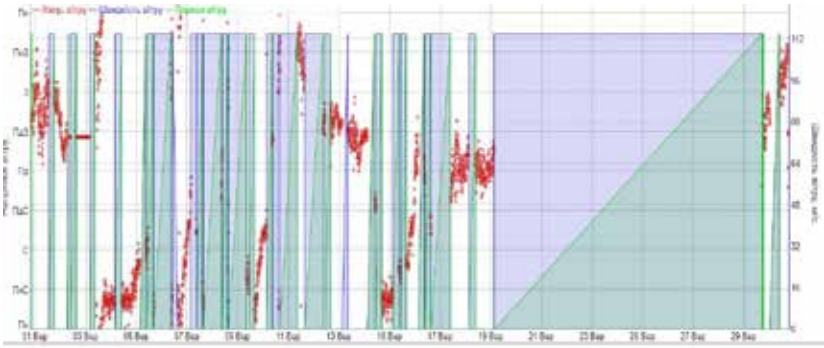


Рис. 3. Напрям, швидкість та пориви вітру у вересні 2023 р.

Кліматична характеристика масиву ґрунтується на даних багаторічних спостережень сніголавинної станції Плай, розташованої на висоті 1330 м над рівнем моря в межах Полонини Боржава. За фізико-географічними умовами ця станція є репрезентативною для оцінювання кліматичних параметрів Полонини Рівної.

Починаючи з висот близько 1000 м над рівнем моря, клімат стає більш суворим і континентальним порівняно з низинними районами Закарпаття. Початок вегетаційного періоду тут зміщується на 3–4 тижні пізніше. Протягом року переважає західний і південно-західний перенос повітряних мас, тоді як східні вторгнення трапляються значно рідше. Атлантичні повітряні маси приносять влітку значні опади, а взимку – інтенсивні снігопади, тумани й тривалу низьку хмарність.

Температурний режим. Середня місячна температура повітря є основним показником термічного режиму території та тісно корелює з річним ходом сонячної радіації. У зимовий період можливі короткочасні відлиги, зумовлені надходженням теплих і вологих атлантичних повітряних мас. Абсолютні максимуми літніх температур сягають майже +27 °C, тоді як мінімальні значення можуть знижуватися до −27 °C. Для холодного періоду характерні температурні інверсії, особливо в умовах антициклональної погоди.

Завдяки інформації про режим середньої місячної температури повітря можна вирішувати багато питань стосовно змін клімату. Річний хід середньої місячної температури майже співпадає з річним ходом сонячної радіації.

Таблиця 1

Середня місячна та річна температура повітря

Місяці	I	II	III	IV	V	VI	VII	VIII	IX	X	XI	XII	Рік
Температура (°С)	−6,1	−5,6	−2,8	3,1	8,1	11,4	13,2	13,4	8,8	4,4	0,1	−4,8	3,6

Із наведених даних табл. 1 видно, що взимку, інколи, і в районі Полонини Рівної можуть бути відлиги, що пов'язано з виносом на Закарпаття теплих і вологих повітряних мас із західними висотними течіями з Атлантики. Абсолютні максимуми температур влітку досить високі (+26,9 °С), а абсолютні мінімуми можуть сягати до −27,6 °С, що фіксується раз в 25–30 років. Частіше відмічаються морози −25 °С–28 °С, раз в 1–2 роки. Досить часто на території гірського масиву, в холодний період року, спостерігаються інверсії температур повітря.

При вторгненні холодних арктичних повітряних мас, як взимку так і влітку, північно-східні схили гір будуть завжди холоднішими від південно-західних схилів, при вітрах північного напрямку за рахунок того, що холодна повітряна маса розповсюджується в південно-східному напрямку – вздовж північно-східного макросхилу Карпат.

Безморозний період продовжується в середньому 145 днів (найдовший був в 1994 р. – 153 дні, найбільш короткий в 2000 р. – 81 день.

Зима на високогір'ї починається, в середньому, в середині листопада і закінчується в кінці березня, коли середньодобові температури повітря стабільно переходять через 0 °С в бік підвищення.

Весняний період відзначається нестійким температурним режимом і частими коливаннями температур. Літо коротке й прохолодне, триває в середньому 55–60 днів, а на висотах понад 1000 м – ще менше, з можливими зниженнями температури до +0–(+5) °С навіть у середині сезону. Осінь нетривала і завершується в середині листопада.

Атмосферні опади та сніговий покрив. Розподіл опадів є нерівномірним як у сезонному, так і в просторовому відношенні: на навітряних південно-західних схилах їх випадає значно більше, ніж на підвітряних північно-східних.

У таблиці 2 наведено середні багаторічні дані щодо атмосферних опадів за 1991–2020 рр.

Таблиця 2

Середня місячна і річна кількість опадів (мм)

Місяці	I	II	III	IV	V	VI	VII	VIII	IX	X	XI	XII	Рік
Опади (мм)	100	104	103	89	133	135	170	104	126	120	135	132	1451

Середня річна кількість опадів у межах Полонини Рівної становить близько 1451 мм, причому більша їх частина припадає на теплий період року.

Поява першого снігового покриву у високогірній частині Полонини Рівної зазвичай припадає на кінець жовтня, тоді як формування стійкого снігового покриву найчастіше відбувається у другій декаді листопада. Танення снігу розпочинається наприкінці березня, проте на північних схилах у багатосніжні роки він може зберігатися до середини квітня. За десятибальною шкалою покриття сніговий покрив у високогір'ї утримується до кінця квітня з інтенсивністю 5–6 балів, а в замкнених улоговинах, які виконують функцію лавинозборів, – до середини травня.

У середньому стійкий сніговий покрив у високогірній зоні Полонини Рівної зберігається близько п'яти місяців. Найбільші запаси снігу акумулюються у третій декаді лютого, коли його щільність досягає максимальних значень і становить 200–400 кг/м³.

Після інтенсивних снігопадів, характерних для зимового періоду (грудень–лютий), у високогір'ї часто реєструються сходження снігових лавин. Спостереження за лавинною активністю впродовж холодного сезону здійснює сніголавинна станція Плай, яка на основі спеціалізованих розрахунків забезпечує своєчасне надання штормових попереджень.

У роки з підвищеною кількістю атмосферних опадів потужність снігового покриву в улоговинах високогірної зони значно зростає, формуючи так звані снігові акумуляції або «снігові намети». За результатами снігомірних спостережень лісових господарств, у лютому 1999 року висота снігу в окремих високогірних пониженнях досягала 2,5–3,0 м, тоді як у гірських долинах вона становила 1,5–2,0 м[20].

Варто зазначити, що на Полонині Рівній формування ожеледі, складних відкладень, а також налипання замерзлого мокрого снігу на проводах, гілках дерев та інших об'єктах у більшості випадків зумовлюється активною циклонічною діяльністю й проходженням атмосферних фронтів над територією Закарпаття. Серед усіх фізико-географічних зон області саме високогірні райони характеризуються найвищою повторюваністю небезпечних ожеледо-паморозевих явищ.

У гірських умовах такі процеси спостерігаються переважно в холодний період року – від кінця листопада до середини березня. За даними сніголавинної станції Плай, а також фахівців, що здійснюють

[20] Закарпатський обласний центр з гідрометеорології. URL: http://gmc.uzhgorod.ua/metdata.php?StNo=33518

обслуговування електромереж в Ужгородському районі, починаючи з абсолютних висот 600–800 м над рівнем моря, в окремі роки максимальна товщина льодових нашарувань або складних відкладень (поєднання льоду та замерзлого мокрого снігу) на дротах і гілках дерев може досягати 80–130 мм. На висотах понад 1000 м н.р.м. цей показник зростає до 140 мм.

Такі явища становлять серйозну небезпеку, оскільки спричиняють значні механічні навантаження на інженерні споруди, лінії електропередачі та рослинність, що призводить до матеріальних збитків і пошкодження природних компонентів ландшафту.

Едафічні чинники. Розвиток рослинного покриву гірських полонин зумовлюється сукупністю едафічних чинників, зокрема типом ґрунтів, їх фізико-хімічними властивостями, рівнем кислотності, температурним режимом і зволоженням, а також морфологією схилів, їх експозицією, площею лучних масивів і тривалістю лісоутворювальних процесів.

Формування флори Полонини Рівної відбувалося поступово як у межах власне полонинських територій, так і в прилеглій приполонинській зоні субальпійського та альпійського висотних поясів (1100–1400 м над рівнем моря). Ці процеси розгорталися переважно на гірських лучно-буроземних ґрунтах, які за морфологічною будовою профілю близькі до неглибоких або середньоглибоких бурих лісових ґрунтів.

У гірській зоні домінують бурі гірсько-лісові середньоглибокі та неглибокі кам'янисті ґрунти. У бурих гірсько-лісових неглибоких кам'янистих пилувато-середньосуглинистих ґрунтах глибина верхнього гумусового горизонту темнувато-бурого кольору, коливається від 8 до 20 см, де по всьому профілю спостерігається щебінь та уламки твердих порід.

У передгір'ї переважають буроземно-підзолисті пилувато-середньосуглинисті і дерново-буроземні середньоглибокі піщано-середньосуглинисті ґрунти. Зв'ясовано, що буроземно-підзолисті пилувато-середньосуглинисті ґрунти характеризуються низькими фізико-хімічними властивостями, зокрема слабим водно-повітряним режимом і швидким набуханням за умов зволоження. Вони поширені переважно на пологих вершинах і пологих схилах увалів, мають пилувато-грудкувату структуру гумусового шару й на глибині 45–50 см – надзвичайно щільний ілювіальний шар, у якому волога проникає слабо.

Такі фактори негативно впливають на ріст, розвиток кореневої системи та продуктивність багаторічних рослин. Гірсько-лучно-лісові ґрунти сформувалися в перехідній зоні між субальпійськими луками та лісами

й займають обмежені площі. На Полонині Рівній вони безпосередньо межують із бурими гірсько-лісовими ґрунтами та розвиваються під заростями субальпійського криволісся, ялівцю й різнотрав'я. Отже, формування та сучасний стан флори Полонини Рівної визначаються комплексною взаємодією абіотичних чинників, серед яких провідну роль відіграють рельєф, кліматичні умови та едафічні особливості. Висотна поясність, вирівняний характер вершинної поверхні та експозиція схилів зумовлюють мозаїчність рослинного покриву й просторову диференціацію фітоценозів. Суворий гірський клімат із коротким вегетаційним періодом, значною кількістю атмосферних опадів, тривалим сніговим покривом і частими небезпечними метеорологічними явищами істотно обмежує видовий склад і продуктивність рослинності. Ґрунтові умови, представлені переважно бурими гірсько-лісовими та гірсько-лучно-буроземними ґрунтами з невеликою потужністю гумусового горизонту, додатково впливають на розвиток кореневих систем і життєві стратегії рослин. Сукупна дія зазначених абіотичних чинників формує специфічні екологічні умови існування флори Полонини Рівної та зумовлює її адаптивний характер і відносну стійкість у межах високогірних екосистем.

3. Сучасний стан, проблеми та перспективи використання фітоценозів полонини Руна

Рослинний покрив субальпійського та альпійського висотних поясів Українських Карпат має істотне господарське значення для гірських і передгірських районів Закарпатської області. Упродовж тривалого історичного періоду біорізноманіття полонин зазнавало впливу різних форм антропогенної діяльності, інтенсивність і характер яких поступово змінювалися.

На ранніх етапах освоєння гірських територій людський вплив був обмежений традиційними видами природокористування, зокрема випасанням худоби, збиранням ягід, грибів і лікарських рослин. Однак із часом масштаби антропогенного навантаження суттєво зросли. Використання субальпійської та альпійської рослинності як пасовищ розпочалося ще у IV–V століттях, тоді як значне посилення випасу припадає на XVI–XVII століття. Це було пов'язано із забороною випасання худоби у феодальних лісах та її вимушеним переведенням на відкриті високогірні пасовища. Внаслідок цього почалося активне знищення первинних субальпійських рослинних формацій і поступове зниження верхньої межі лісу.

Багатовіковий випас негативно позначається на стані приполонинських лісів: змінилася конфігурація верхньої межі лісової

рослинності, порушилася структура деревних і чагарникових угруповань, а також знизилася їх водоохоронна роль. Значні трансформації зазнали й криволісся та трав'янисті фітоценози.

Найбільш інтенсивний антропогенний вплив на полонини Закарпаття спостерігався у період 1950–1985 років. У цей час, із створенням радгоспів і колгоспів, полонини широко використовувалися для літнього випасу великої рогатої худоби, овець і коней, а також для заготівлі сіна. Природно-кліматичні умови сприяли ефективному нагулу худоби та вирощуванню молодняка. Разом із тим господарська діяльність призвела до суттєвих змін трав'янистої рослинності як за кількісними, так і за якісними показниками.

Результати численних наукових досліджень, проведених на полонинах Закарпаття, засвідчують, що впровадження агротехнічних заходів – регулювання режиму випасу, догляд за травостоєм і внесення добрив – істотно підвищили продуктивність високогірних пасовищ. Водночас такі заходи спричиняли зміну ботанічного складу угруповань, зазвичай у напрямку зростання кормової цінності травостою. У межах тогочасних програм розвитку сільського господарства практикувалося також масове знищення чорнично-брусничних угруповань, які вважаються непридатними для створення сіножатей, що негативно вплинуло на природну структуру фітоценозів. Внаслідок цього переважна частина сучасної флори та рослинних угруповань полонин має вторинне походження.

Після ліквідації колгоспної системи антропогенне навантаження на полонини частково зменшилося, однак випас свійських тварин і надалі залишається важливим чинником трансформації трав'янистого покриву, зокрема на Полонина Рівна. Насамперед змін зазнає первинна природна флора, а згодом – вторинні рослинні угруповання. Найбільшої шкоди завдають табуни коней, які інтенсивно затоптують рослинність і виїдають її до кореневої системи, зокрема види формацій костриці червоної (Festuca rubra s. str.), костриці крейдяної (Festuca cretacea) та різнотрав'я.

Нерівномірний розподіл антропогенного навантаження по території спричиняє перерозподіл видів різних життєвих форм. Посилення випасу та витоптування стимулює поширення щільнодернинних видів, тоді як відновлення і розмноження рослин інших життєвих стратегій істотно ускладнюється через погіршення ґрунтової структури.

Особливо чутливими до механічного впливу є угруповання цетрарії ісландської (Cetraria islandica), які швидко деградують навіть за помірного випасу, що призводить до оголення ґрунтової поверхні. На таких ділянках

первинні альпійські ценози поступово заміщуються костричниковими угрупованнями внаслідок експансії щільнодернинних видів. Додатковим чинником зменшення чисельності цетрарії є її заготівля як лікарської сировини, попри занесення виду до Червоної книги України.

У сукупності всі зазначені форми господарського використання, насамперед випас худоби, спричинили істотне зниження природної верхньої межі лісу та формування вторинних лучних угруповань на місці колишніх лісових масивів.

Окремим чинником антропогенного впливу на полонинські екосистеми було використання Полонини Рівної у військових цілях у радянський період. Свідченням цього є збережені донині руїни колишньої радіолокаційної станції «Барс», яка мала стратегічне значення.

Ще одним суттєвим видом антропогенної діяльності, що чинить інтенсивний вплив на флору Полонина Рівна, є збирання та заготівля ягід чорниці звичайної. Якщо раніше збір дикорослих ягід мав переважно рекреаційно-побутовий характер, то нині він трансформувався у форму комерційного промислу, що значно посилило антропогенне навантаження на природні угруповання.

Стресовий вплив людської діяльності призводить до змін флористичної структури біоценозів через перебудову горизонтальної та вертикальної організації рослинного покриву, трансформацію світлового режиму та залучення нових видів до формування фітоценозів. Короткочасний і локалізований антропогенний вплив зазвичай зумовлює лише незначні, зворотні зміни у структурі популяцій, однак ці зміни мають чітку спрямованість на індивідуальному та внутрішньопопуляційному рівнях. Найчастіше вони проявляються у зниженні життєздатності генеративних особин, зміні темпів старіння й омолодження, а також у реверсивних процесах, тоді як загальна чисельність дорослих рослин і щільність популяцій залишаються відносно стабільними. Найбільш чутливою до низькоінтенсивного антропогенного тиску виявляється генеративна сфера рослин.

Систематичний збір ягід істотно порушує репродуктивні процеси чорниці звичайної (Vaccinium myrtillus L.). Встановлено також прямий і опосередкований негативний вплив на відтворення популяцій рідкісних видів рослин. Значної шкоди екосистемам завдає й заготівля лікарських рослин, зокрема тирличу ваточникового (Gentiana asclepiadea L.) та перстача прямостоячого (Potentilla erecta (L.) Raeusch.).

Загальне погіршення стану довкілля, спричинене інтенсивною господарською діяльністю, призвело до скорочення чисельності або повного зникнення окремих видів рослин. Особливо вразливою

до антропогенного впливу є рослинність високогір'я та полонин Українських Карпат, де наслідки порушень мають довготривалий і потенційно незворотний характер.

Останніми роками антропогенне навантаження на високогірні райони Карпат зросло за рахунок активізації гірського туризму, збирання лікарської сировини, ягід і грибів, а також зривання туристами рідкісних декоративних і лікарських рослин. Особливо небезпечними для біоти й ґрунтового покриву є агресивні види рекреації, такі як квадроциклінг і джипінг, які спричиняють лінійну ерозію та руйнування дернини.

Водночас нині розглядається питання надання компанії «Вітряні Парки України» дозволу на розроблення документації із землеустрою з подальшою орендою частини території полонини Руної для встановлення дослідних вітрових щогл і подальшого будівництва вітроенергетичних установок, що потребує всебічної екологічної оцінки можливих наслідків.

Варто зазначити, що південні та західні схили масиву Полонина Рівна частково охоплюються об'єктами природно-заповідного фонду загальнодержавного значення, зокрема загальнозоологічним заказником Тур'я-Полянський (2163,0 га) та орнітологічним заказником Соколові скелі (605,6 га). На базі цих територій доцільним є створення природоохоронної установи кластерного типу, наприклад регіонального ландшафтного парку «Полонина Рівна».

Польові обстеження засвідчують, що під дією природних і господарських чинників (площинна ерозія, систематичний випас) відбувається зниження трофічності ґрунтів. У результаті мітлицеві луки поступово заміщуються кострицевими, а згодом деградують до біловусових угруповань, які є найменш продуктивними та флористично збідненими. Прямий антропогенний вплив найчастіше проявляється у механічному пошкодженні рослин внаслідок стравлювання, зривання, витоптування та викопування. Опосередкована дія пов'язана зі змінами властивостей едафотопу та фітосередовища: ущільненням, оголенням і деградацією верхніх горизонтів ґрунту.

Відновлення рослинного покриву у високогірних умовах полонини Руної відбувається надзвичайно повільно, що зумовлено несприятливими умовами для розвитку підросту генеративного походження та низькою швидкістю заселення порушених ділянок вегетативно рухливими видами.

Антропогенний тиск спричиняє трансформацію біоценозів шляхом перебудови просторової структури рослинного покриву й формування вторинних угруповань. За умов надмірного випасу та посиленого

дернового процесу на місці лісових, чагарникових і лучних формацій виникають щучникові та біловусові луки. Водночас червонокострицеві угрупування трансформуються у біловусові, а на стійбищах формуються щавельники. Це зумовлює необхідність впровадження контрольованого, науково обґрунтованого збору ягід чорниці та лікарських рослин без порушення їхніх репродуктивних функцій.

ВИСНОВКИ

Полонина Рівна є одним із найбільших високогірних масивів Українських Карпат і характеризується мозаїчним поєднанням чорничників та високогірних лук, сформованих у специфічних абіотичних умовах (висока зволоженість, короткий вегетаційний період, тривалий сніговий покрив, часті ожеледо-паморозеві явища, контрастні едафічні умови). Сучасний фітоценоз має переважно вторинне походження, оскільки багатовіковий випас і господарське освоєння призвели до зниження верхньої межі лісу, деградації криволісся та формування вторинних лучних угруповань. У XX ст. (особливо 1950–1985 рр.) «оптимізаційні» агрозаходи, зокрема втручання в чорнично-брусничні ценози, істотно змінили ботанічний склад і просторову структуру рослинного покриву.

Нині ключовими факторами деградації є надмірний і нерівномірний випас худоби, що спричиняє витоптування, оголення й ущільнення ґрунту та сукцесійні зміни зі зниженням трофічності й переходом продуктивніших лук у біловусникові як флористично збіднені. Додатково посилюються ризики через промисловий збір ягід чорниці, заготівлю лікарської сировини, зривання рідкісних рослин і рекреаційні впливи. Найбільш руйнівними є квадроциклізм і джипінг, що формують лінійну ерозію та руйнують дернину. Відновлення рослинності у високогір'ї є повільним, тому навіть локальні порушення можуть мати тривалий ефект. Потенційні нові землекористування (зокрема підготовка територій під вітроенергетичні проєкти) потребують екологічно виважених рішень, оскільки можуть посилити фрагментацію оселищ і деградацію ґрунтів. Визначено, що збереження фітоценозів Полонини Руної потребує поєднання охорони ключових оселищ, регульованого традиційного природокористування та постійного моніторингу, що забезпечить екологічну стабільність території й можливість її сталого використання.

АНОТАЦІЯ

У статті проаналізовано сучасний стан фітоценозів полонини Руної (Рівної) в Українських Карпатах у контексті дії абіотичних

чинників і тривалого антропогенного навантаження. Розглянуто особливості просторової структури рослинного покриву, висотної поясності та едафічних умов формування високогірних лучних і чагарникових угруповань. Встановлено, що переважна частина сучасної рослинності полонини має вторинне походження, сформоване внаслідок багатовікового випасу та господарського використання території. Показано, що домінуючими типами фітоценозів є чорничники та біловусникові високогірні луки, які відзначаються мозаїчністю й різним ступенем антропогенної трансформації. Виявлено негативний вплив надмірного та нерівномірного випасу, промислового збору ягід і лікарських рослин, а також рекреаційного навантаження на видовий склад і репродуктивну здатність рослин. Обґрунтовано, що деградація ґрунтового покриву й ущільнення дернини зумовлюють сукцесійні зміни у напрямі формування малопродуктивних біловусникових угруповань. Визначено, що відновлення рослинного покриву у високогірних умовах відбувається повільно й потребує тривалого часу. Наголошено на необхідності впровадження науково обґрунтованих заходів з охорони та раціонального використання фітоценозів, зокрема регулювання випасу й збору природних ресурсів. Отримані результати можуть бути використані для розроблення природоохоронних і управлінських рішень, спрямованих на збереження біорізноманіття полонинських екосистем.

Література

1. Руденко В. П. Географія природо-ресурсного потенціалу України. Чернівці : Чернівецький нац. ун-т., 2010. 552 с.

2. Малиновський К. А. Крічфалушій В. В. Рослинні угруповання високогір'я Українських Карпат. Ужгород, 2002. 244 с.

3. Малиновський К. А. Рослинність високогір'я Українських Карпат. Київ : Наук. думка, 1980. 278 с.

4. Вайнагій І. Йдемо полонину косити? Ужгород : Зелені Карпати, 1995. № 1–2. С. 120–123.

5. Порядок денний на XXI століття. URL: https://dev.sd4ua.org/shho-take-stalij-rozvitok/istoriya/

6. Антропогенні зміни біогеоценотичного покриву в Карпатському регіоні / за ред. М. А. Голубця. Київ : Наук. думка, 1994. С. 17–22.

7. Брадіс Є. М. Полонини Закарпатської області, їх використання та шляхи поліпшення. Київ : Вид-во АН УРСР, 1951. 68 с.

8. Горбик В. Н. Рослинність полонин Попадя та Чивчин в Українських Карпатах. *Український ботанічний журнал.* 1967. Т. 26, № 1. С. 22–28.

9. Малиновський К. А., Крічфалушій В. В. Високогірна рослинність. Київ : Фітосоціоцентр. 2000. Т. 1. 232 с.

10. Фекета І. Ю. Екологічні проблеми фіторізноманіття полонин Українських Карпат. *Вісник Харківського національного університету імені В. Н. Каразіна. Серія: геологія–географія–екологія*. 2011. № 956. Вип. 34. С. 234–238.

11. Фекета І. Ю., Григорюк І. П., Якубенко Б. Є. Геоботанічна характеристика рослинності полонини Руної Карпат в умовах антропогенної трансформації. *Науковий вісник НУБіП України. Серія: біологія, біотехнології, екологія.* 2011. Вип. 158. С. 19–27.

12. Фекета І. Ю. Характеристика рослинності полонини-Руни карпат в умовах антропогенної трансформації. *Вісник Львівського університету. Серія географічна.* 2014. Вип. 45. С. 137–143.

13. Кукурудза С. І. Біогеографія : підручник. Львів : Видавничий центр ЛНУ імені Івана Франка, 2006. 504 с.

14. Googl map. URL: https://www.google.com/maps/place

15. Лазаренко А. С., Мельничук В. М., Малиновський К. А. Поліпшення біловусникових пасовищ субальпійського поясу Карпат. *Праці Інституту агробіології АН УРСР.* 1953. Вип. 6. С. 47–76.

16. Бедей М. І. Вплив мінеральних добрив на продуктивність кострицевих лук у субальпійському поясі Карпат. *Український ботанічний журнал.* 1966. Т. 25, № 1. С. 55–61.

17. Комендар В. І. Лікарські рослини Карпат. Дикорослі та культурні. Ужгород, Мистецька лінія, 2007. 504 с.

18. Теслович М., Кричевська Д., Брусак В. Морфодинамічний аналіз рельєфу південно-східної частини полонини Рівної методами гіс-моделюваннядля природоохоронних потреб. *Проблеми геоморфології і палеогеографії.* 2022. Вип. 1 (14). С. 128–146. DOI 10.30970/gpc.2022.1.3857

19. Метеопост. Приватна метеостанція у Полонині Руні. URL: https://meteopost.com/ua/mstation/runa/#google_vignette

20. Закарпатський обласний центр з гідрометеорології. URL: http://gmc.uzhgorod.ua/metdata.php?StNo=33518

Information about the author:
Feketa Iryna Yuriiivna,
Candidate of Biological Sciences,
Associate Professor at the Department of Physical Geography
and Rational Nature Management,
State University “Uzhhorod National University”
3, Narodna square, Uzhhorod, 88000, Ukraine

02
SECTION

ECOLOGY

CHAPTER 3

ENVIRONMENTAL PRINCIPLES IN THE DEVELOPMENT OF SCIENTIFIC STRATEGIES FOR THE CONSERVATION AND RESTORATION OF NATURAL ECOSYSTEMS UNDER ANTHROPOGENIC PRESSURE

Voloshanska S. Ya., Kvasnii L. H., Drozd I. F.
DOI https://doi.org/10.30525/978-9934-26-654-6-3

INTRODUCTION

In the 21st century, the problem of preserving and restoring natural ecosystems has become a global and key challenge for sustainable human development. The rapid growth of anthropogenic pressure caused by urbanization, industrialization, the transformation of agricultural landscapes, excessive exploitation of natural resources, and climate change has led to a significant disruption of the natural self-regulating mechanisms of ecosystems. This leads to land degradation, reduced biodiversity, disruption of the hydrological regime in these areas, and a decrease in the ability of ecosystems to provide vital ecosystem services.

The issue of environmental principles underlying the development of scientific strategies for the conservation and restoration of natural ecosystems is particularly relevant in the context of increasing anthropogenic pressure, when traditional approaches to nature conservation prove insufficiently effective. Modern environmental science is shifting its focus towards integrated, interdisciplinary solutions combining ecosystem-based approaches, adaptive management principles, and innovative environmental monitoring methods. The development of such strategies requires a deep scientific understanding of the patterns governing the functioning of natural systems, the limits of their stability, and their capacity for recovery.

The development of scientific strategies for ecosystem conservation is based on an environmental approach that involves a comprehensive analysis of the interaction between biotic and abiotic components of the environment, as well as an assessment of the anthropogenic impact on the structural and functional organization of ecosystems. The preservation of natural systems is impossible without considering the spatial integrity of landscapes,

preserving ecological corridors, maintaining natural succession processes, and protecting key biotopes. Simultaneously, the role of scientifically substantiated forecasting of environmental changes is growing, enabling the prevention of critical ecosystem disturbances and the minimization of negative consequences from economic activity.

Restoring degraded natural ecosystems is a complex and multifaceted process requiring a combined approach of passive and active environmental restoration methods. Passive approaches are based on reducing or eliminating anthropogenic pressure and creating conditions for the natural restoration of ecosystem functions. Active methods involve targeted measures to recultivate disturbed land, restore water bodies, regenerate vegetation cover, and reintroduce native species. Selecting the optimal restoration strategy should be based on the ecological characteristics of a specific ecosystem, the degree of its degradation, and the socio-economic conditions prevailing in the region[1].

In the context of global and regional environmental challenges, especially for countries with transitional economies, it is critically important to integrate ecological principles into strategic planning and natural resource management systems. Scientific strategies for the conservation and restoration of ecosystems must be consistent with the goals of sustainable development, environmental safety, and improving the living standards for the population. In this context, the formation of ecological culture, the development of environmental education and the involvement of the public in environmental decision-making processes play an important role.

Therefore, the study of the ecological principles forming scientific strategies for the conservation and restoration of natural ecosystems under anthropogenic pressure is scientifically and practically significant. It is aimed at substantiating effective approaches to preserving natural potential, increasing the sustainability of ecosystems and ensuring the balanced development of society. The results of such studies can be used in the development of national and regional environmental programs, natural resource management strategies, and practical measures for environmental restoration[2].

1. Ecological prerequisites for the formation of scientific strategies for the conservation of natural ecosystems

The formation of scientific strategies for the preservation of natural ecosystems is based on a deep understanding of the ecological patterns in

[1] Bochevska M. E. Restoration of degraded ecosystems in the context of post-war transformation of nature management. *Academic visions*. 2025. Issue 43. DOI: https://doi.org/10.5281/zenodo.15585538

[2] Argenti P. Reputation and corporate brand. *Review of corporate reputation.* 2004. No. 6. P. 371.

the functioning of the natural environment and its ability to self-regulate. Melnykovych M., Nijnik M., Zibtsov S. et al. conducted a comprehensive analysis of the impact of hostilities on the socio-ecological systems of Ukraine's forest ecosystems and outlined possible directions for their further restoration in their studies[3]. Researchers emphasize the advisability of introducing nature-oriented solutions into the process of forming policies for the restoration of forest ecosystems. At the same time, Mirzabaev A. and Wuepper D. focused on the economic dimensions of the restoration of degraded ecosystems, emphasizing that investing in environmental restoration can provide tangible economic benefits, in particular by creating new jobs and improving the well-being of local communities[4].

Natural ecosystems are complex dynamic systems whose stability is determined by the level of biodiversity, trophic structure, and the intensity of energy and matter exchange between their components. The increase in anthropogenic load disrupts these connections, which leads to a decrease in environmental resilience and an increase in the risk of degradation processes.

Scientific approaches to ecosystem conservation involve the application of ecosystem and landscape approaches, allowing the assessment of anthropogenic factors in a spatial-temporal dimension. Defining ecologically acceptable limits for the economic use of natural resources and establishing critical thresholds for anthropogenic pressure are important elements. In this context, the role of environmental monitoring, bioindication, and forecasting of changes in the condition of ecosystems is growing, providing a scientific basis for management decisions in the sphere of environmental protection. Scientists note that the limited maturity of the sustainable investment market, the insufficient level of institutional support for environmentally oriented business models and limited tax incentives prevent the scaling of environmentally oriented solutions that could serve as synergies between economic development and environmental protection[5].

In such conditions, local communities are often forced to rely on their own resources and initiatives, which limits the scale and speed of implementation of environmentally friendly technologies and renewable energy projects. At the same time, the lack of proper financing of instruments, grant programs and

[3] Melnykovych M., Nijnik M., Zibtsev S., et al. Pathways for Ukraine's Post-War Recovery: Forest Socio-Ecological System in the Focus. *Preprints.org.* 2025. DOI: https://doi.org/10.20944/preprints202502.1736.v1

[4] Mirzabaev A., Wuepper D. Economics of Ecosystem Restoration. *Annual Review of Resource Economics*. 2023. Vol. 15. P. 329–350. DOI: https://doi.org/10.1146/annurevresource-101422-085414

[5] Bochevska M. E. Restoration of degraded ecosystems in the context of post-war transformation of nature management. *Academic visions.* 2025. Issue 43. DOI: https://doi.org/10.5281/zenodo.15585538

state support mechanisms hinders the development of the "green" economy, reduces the attractiveness of environmental investments for business and makes it impossible to comprehensively restore degraded ecosystems. This is especially relevant for the post-war reconstruction of Ukraine, where the scale of destruction and land degradation requires significant resources, systematic planning and integration of nature-oriented solutions. At the same time, initiatives aimed at supporting environmentally sustainable community development are already in place at the national level, in particular, the state programs "Energy Modernization in the Community"[6] and "Clean Air for Ukraine[7]," which provide grants and loans for building insulation, installation of energy-efficient technologies, and modernization of heat generation capacities in accordance with environmental standards.

Institutional support is also intensified through the implementation of the provisions of the National Recovery Plan of Ukraine and relevant local development programs, where the environmental component is included as a priority. For example, under the Green Reconstruction program,[8] community and municipal initiatives receive funding for the reclamation of degraded land, the cleanup of water bodies, and the restoration of green areas, which is implemented in cooperation with international partners: UNDP, UNEP, the European Investment Bank, and EU funds. Similar initiatives have already supported energy efficiency and environmental improvement projects in communities of Lviv, Kyiv and Kharkiv regions, demonstrating the potential of combining state, local and international support for large-scale implementation of environmental innovations. In the long term, such approaches could form the basis for a national model of post-war recovery, combining the environmental, economic, and social aspects of sustainable development in local communities.

2. Scientific approaches to ecosystem restoration under anthropogenic pressure

Restoring natural ecosystems that have been damaged by long-term human activity is one of the key areas of focus in modern environmental science. Scientific strategies for restoration are based on a combination of

[6] State program "Energy modernization in the community". URL: https://www.kmu.gov.ua/news/zatverdzheno-derzhavnu-tsilovu-prohramu-enerhetychnoi-modernizatsii-pidpryiemstv-teplopostachannia-do-2030-roku

[7] State program "Clean Air for Ukraine". URL: https://liubym.otg.dp.gov.ua/novini-ta-podiyi/novini/prohrama-chyste-povitria-dlia-ukrainy

[8] Post-war green reconstruction of Ukraine: processes, stakeholders, public participation analytical report January – February 2024. URL: https://racse-report_2024-5-13-1_ukr.pdf

passive and active methods of environmental restoration, which are selected depending on the type of ecosystem, the degree of its degradation, and the environmental conditions in the region. Passive restoration involves reducing the intensity of anthropogenic pressure and creating favorable conditions for natural succession, while active measures include targeted intervention to restore key ecosystem functions.

The position of the OECD in terms of overcoming institutional and economic barriers in Ukraine's environmental recovery policy is to increase institutional capacity and implement the principles of good governance, in particular through improving the judicial system and strengthening anti-corruption mechanisms, as well as adapting the environmental taxation system to the standards and requirements of the European Union[9].

The principle of prioritizing the restoration of natural processes over man-made solutions is particularly important in the formation of scientific restoration strategies. UNIDO emphasizes the need to formulate and implement a green industrial reconstruction program for 2024–2028, aimed at stimulating the introduction of environmentally friendly technologies and compliance with modern environmental standards[10].

A systematic analysis of current scientific sources[11] has shown that among the existing approaches to ecosystem restoration, the leading ones are socio-ecological, economic, legal, and nature-oriented approaches. At the same time, the methodologies of international organizations such as OECD, UNEP, UNDP, UNIDO and the World Bank are highly structured and scientifically sound, which makes them suitable for the application in the Ukrainian context.

Restoration of hydrological regimes, soil cover, plant communities and food chains contributes to increasing the environmental sustainability of ecosystems and reducing the need for further intervention. At the same time, the application of modern scientific methods, namely ecological modeling, geographic information systems, and ecosystem services assessment, can improve the effectiveness of restoration measures and ensure their long-term effectiveness.

[9] OECD. *Ukraine – OECD*. URL: https://www.oecd.org/en/countries/ukraine.html

[10] United Nations Industrial Development Organization. Green Recovery Vision for Ukraine. URL: https://www.unido.org/green-recovery-vision-ukraine

[11] UNECE, UNEP, OECD. Platform for Action on the Green Recovery of Ukraine URL: https://ukraine.un.org/en/271424-unece-unep-and-oecd-launch-platform-action-green-recoveryukraine

3. Features of developing scientific strategies for the conservation and restoration of ecosystems in Ukraine

For Ukraine, the issue of preserving and restoring natural ecosystems is particularly important because of the combination of traditional anthropogenic factors and the consequences of military action and technogenic pressure. Significant plundering of the territory, intensive use of land and water resources, urbanization and industrial pollution for a long time formed a high level of environmental vulnerability of natural systems. The hostilities additionally caused the destruction of landscapes, pollution of soils and waters, degradation of forest and steppe ecosystems, which significantly complicates the processes of their natural restoration. Today, the ecological state of land in Ukraine is extremely critical as a result of the military aggression of the Russian Federation. A significant portion of the land has suffered degradation, mechanical damage, and pollution, leading to widespread erosion. Hostilities cause the accumulation of toxic chemicals and heavy metals in the soil, while explosions from mines, rockets, and bombs create craters, disrupting the landscape and soil structure. In addition, there is a total violation of the basic land law principles that guarantee rational use and protection of land, as well as disregard for the priority of environmental safety requirements at the national level. Such a complex of negative impacts creates serious obstacles to the restoration of land resources and requires the development of evidence-based strategies for their rehabilitation and protection.

It should be noted that the problems of soil fertility preservation in Ukraine took place before the war. Thus, almost 26 % (about 16 million hectares) of soil cover was already eroded, and more than 15 % of this land needed to be withdrawn from cultivation and conservation activities[12].

Restoration of degraded lands in Ukraine under conditions of constant anthropogenic and military influence requires an integrated scientific approach. Priority strategies include reclamation of damaged areas, stabilization of erosion processes, cleaning of soils from toxic substances and heavy metals, as well as restoration of the landscape structure of the territories. An effective approach is to combine passive methods, which involve limiting anthropogenic impact and supporting natural succession, with active measures such as planting adapted plant communities, restoring water regimes, and creating ecological corridors. The integration of these measures into state programs for post-war reconstruction and land resource management, taking

[12] Novakovska I. O., Skrypnyk L. R., Slavin I. V. Economic incentives for the implementation of measures for the land use and protection. *Problems of the systemic approach in the economy*. No. 2 (82). 2021. P. 150–161.

into account the priority of environmental safety, plays an important role. The application of scientifically sound restoration strategies not only stabilizes the condition of land resources but also creates conditions for the further sustainable development of Ukraine's agricultural and environmental sectors, ensuring the restoration of ecological balance in the affected areas.

Scientific strategies for the conservation and restoration of ecosystems in Ukraine should take into account the regional specifics of natural and climatic conditions, the level of anthropogenic load and socio-economic challenges. In particular, in the east and south of Ukraine, where a significant part of the territories has been destroyed as a result of hostilities, the priority is the restoration of degraded lands, the purification of water bodies and the reclamation of industrial zones. In the western and central regions, the conservation of forests, the development of green corridors and the integration of environmental elements into urban planning and agricultural plans are important. Scientific strategies should provide a comprehensive approach integrating scientifically sound methods for monitoring and assessing the health of ecosystems, effective management decisions for local communities, financial and institutional mechanisms to support restoration, and the integration of international standards and programs such as the UN Decade on Ecosystem Restoration and the European Green Deal. This approach allows not only to restore ecosystems, but also to increase the resilience of communities to climate and anthropogenic risks, forming the prerequisites for the sustainable development of Ukraine.

Priority areas are the restoration of degraded lands, rehabilitation of water bodies, conservation of biodiversity and the formation of a national ecological network, which involves the restoration of natural landscapes, ensuring the spatial integrity of ecosystems and maintaining ecological corridors. The implementation of these areas should be based on the application of the ecosystem approach, the integration of nature-oriented solutions and the introduction of modern environmental monitoring tools. Coordinating environmental protection measures with regional socio-economic development and post-crisis recovery programs is an important aspect.

One of the prerequisites for land reclamation and conservation in Ukraine in the post-war period is the development and legislative approval of a national program for land protection and restoration. This program should include a detailed plan for land restoration involving international organizations, investors, and foreign scientists in the field of soil protection and restoration, as well as the use of innovative technologies and approaches. In addition, the document needs to identify the sources of funding and procedures for land

management, since these issues remain insufficiently regulated at the current legislative level[13]. The nationwide program for the protection and restoration of Ukraine's land in the post-war period will serve as a strategic guideline for the state, defining priority measures for land restoration, in particular conservation and recultivation. The[14] program will provide for comprehensive planning of restoration work, taking into account soil types, the degree of their degradation, and local natural conditions, as well as the integration of modern scientific methods for monitoring and assessing the condition of land. Particular attention will be paid to coordination between national and local authorities, involving local communities in planning and implementation, and drawing on international experience and financial support, including grants and technical assistance from UNDP, UNEP, and the European Investment Bank. Such integrated management will not only restore soil fertility and stabilize ecosystems, but also ensure sustainable development of territories, increase environmental safety and integrate environmental principles into local development strategies.

Table 1

The main directions and measures of the National Program for the Protection and Restoration of Lands of Ukraine (post-war period)

Direction of the program	Specific activities	Executors / Responsible persons	Financing sources	Expected effect
1	2	3	4	5
Land conservation	Temporary withdrawal of degraded areas from cultivation, erosion prevention measures, and protection against pollution	Ministry of Agrarian Policy and Food, territorial communities	State budget, local budgets, international grants	Preservation of soil fertility, reduction of land degradation
Land Remediation	Restoration of industrial, military and contaminated areas, restoration of soil structure, landscape rehabilitation	Local authorities, private contractors, academic institutions	State subventions, international programs (UNDP, UNEP, EIB)	Restoring ecosystems, improving environmental safety, increasing land productivity

[13] Agriculture of Ukraine under martial law: lessons for society and politicians. URL: https://www.nas.gov.ua/UA/Messages/Pages/View.aspx?MessageID=9288

[14] National Academy of Agrarian Sciences of Ukraine. Scientific, methodological, and coordination center for scientific issues related to the development of Ukraine's agro-industrial complex. URL: http://naas.gov.ua/content/ publichna-informaciya/ogoloshennya/7393/

Continuation of Table 2

1	2	3	4	5
Monitoring and assessment of land condition	Regular assessment of soil degradation, pollution monitoring, and geoinformation database management	Ukraine State Service of Geodesy, Cartography and Cadastre, scientific institutes	State budget, grant funding	Scientifically based planning of activities, control over the program implementation
Institutional support and management	Coordination between national and local authorities, integration of environmental principles into local strategies	Cabinet of Ministers, Ministry of Economy, Environment and Agriculture of Ukraine, territorial communities	State budget and international technical assistance	Improving management efficiency, shaping environmental culture and community responsibility
Supporting the green economy	Stimulation of environmentally safe land use, introduction of energy-efficient and nature-oriented technologies	Local authorities, business, international partners	Government grants, loans from international financial organizations	Sustainable development of territories, synergy of economic growth and environmental protection

This approach will contribute to increasing the resilience of natural systems, reducing environmental risks and ensuring long-term environmental safety. The integration of scientific environmental approaches into state environmental policy, spatial planning systems, and post-war land restoration programs plays an important role in this process, ensuring the coordination of environmental, economic, and social measures. Such integration contributes to improving the effectiveness of restoration measures, strengthening the environmental sustainability of regions and creates prerequisites for sustainable development and long-term conservation of natural ecosystems.

Thus, the implementation of scientifically sound environmental strategies in Ukraine is a prerequisite for ensuring environmental safety and sustainable development of the state. The combination of fundamental environmental knowledge, innovative technologies and effective management of natural resources creates the prerequisites for preserving the country's natural potential and increasing the sustainability of its ecosystems in the long term.

CONCLUSIONS

The study found that the increase in anthropogenic pressure is a determining factor in the degradation of natural ecosystems, which manifests itself in a violation of their structural integrity, a decrease in biodiversity and a weakening of the ability to self-regulation. Under such conditions, the conservation and restoration of ecosystems requires a shift from fragmented conservation measures to comprehensive, scientifically sound strategies based on ecosystem and interdisciplinary approaches.

It has been proven that the environmental principles underlying scientific strategies for the conservation of natural ecosystems must be based on consideration of the interaction between biotic and abiotic components of the environment, determination of the limits of acceptable anthropogenic pressure, and assessment of the ecological stability of natural systems. Environmental monitoring, bioindication, and forecasting tools play an important role in this process, ensuring the timely detection of negative changes and providing scientific justification for management decisions.

It has been established that effective restoration of degraded ecosystems is possible provided that passive and active methods of environmental restoration are combined, with priority given to the restoration of natural processes. Specific restoration measures should be selected, taking into account the type of ecosystems, the degree of their disturbance, and regional natural and climatic characteristics. This approach contributes to increasing the resilience of ecosystems and reducing the risks of repeated degradation.

The study pays particular attention to the specifics of developing scientific strategies for the conservation and restoration of natural ecosystems in Ukraine, where traditional anthropogenic factors are exacerbated by the consequences of hostilities. The necessity of integrating environmental strategies into the system of state policy, spatial planning, and post-war reconstruction programs is justified in order to ensure environmental safety and sustainable development of territories.

Consequently, the implementation of scientifically sound strategies for the conservation and restoration of natural ecosystems is a key prerequisite for preserving natural potential, improving the quality of life of the population, and achieving sustainable development goals. Further scientific research should be aimed at improving methods for assessing ecosystem services, developing nature-based solutions, and strengthening institutional mechanisms for environmental management in the context of growing anthropogenic pressure.

SUMMARY

The paper examines the environmental principles underlying the development of scientific strategies for the conservation and restoration of natural ecosystems in the context of increasing anthropogenic pressure. The main factors of ecosystem degradation and their impact on the structural and functional organization of the natural environment are analyzed. The importance of the ecosystem approach as a methodological basis for the development of effective environmental strategies is substantiated. Scientific approaches to assessing the environmental sustainability and resilience of ecosystems are considered. The role of environmental monitoring, bioindication and forecasting in the management decision-making process is determined. Passive and active methods of restoring degraded ecosystems are characterized. Particular attention is paid to the integration of nature-oriented solutions in the strategy of environmental restoration. The specifics of forming scientific strategies for preserving ecosystems in the context of wartime and post-war challenges are analyzed. The importance of combining environmental, economic and social aspects in the process of restoring natural systems is emphasized. It is concluded that it is necessary to implement comprehensive science-based strategies to ensure environmental safety and sustainable development.

Bibliography

1. Бочевська Марія Євгенівна. Відновлення деградованих екосистем в умовах поствоєнної трансформації природокористування. *Зенодо*. 2025. DOI: https://doi.org/10.5281/zenodo.15585538

2. Державна програма «Енергетична модернізація в громаді». https://www.kmu.gov.ua/news/zatverdzheno-derzhavnu-tsilovu-prohramu-enerhetychnoi-modernizatsii-pidpryiemstv-teplopostachannia-do-2030-roku

3. Державна програма «Чисте повітря для України». URL: https://liubym.otg.dp.gov.ua/novini-ta-podiyi/novini/prohrama-chyste-povitria-dlia-ukrainy

4. Мельникович М., Нижник М., Зібцев С. та ін. Шляхи післявоєнного відновлення України: лісова соціо-екологічна система у фокусі. *Preprints.org.* 2025. DOI: https://doi.org/10.20944/preprints202502.1736.v1

5. Mirzabaev A., Wuepper D. Economics of Ecosystem Restoration. *Annual Review of Resource Economics*. 2023. Vol. 15. P. 329–350. DOI: https://doi.org/10.1146/annurevresource-101422-085414

6. Післявоєнна зелена відбудова України: процеси, стейкхолдери, участь громадськості : аналітичний звіт. Січень–лютий 2024 року. URL: https://racse-report_2024-5-13-1_ukr.pdf

7. OECD. Ukraine – OECD. URL: https://www.oecd.org/en/countries/ukraine.html

8. United Nations Industrial Development Organization. *Green Recovery Vision for Ukraine.* URL: https://www.unido.org/green-recovery-vision-ukraine

9. UNECE, UNEP, OECD. Platform for Action on the Green Recovery of Ukraine*. United Nations Ukraine.* URL: https://ukraine.un.org/en/271424-unece-unep-and-oecd-launch-platform-action-green-recoveryukraine

10. Новаковська І. О., Скрипник Л. Р., Славін І. В. Економічні стимули впровадження заходів у сфері використання та охорони земель. *Проблеми системного підходу в економіці.* 2021. № 2 (82). С. 150–161.

11. Сільське господарство України в умовах воєнного стану: уроки для суспільства та політиків. Національна академія наук України. URL: https://www.nas.gov.ua/UA/Messages/Pages/View.aspx?MessageID=9288

12. Науково-методичний та координаційний центр з наукових питань, пов'язаних з розвитком аграрно-промислового комплексу України. *Національна академія аграрних наук України*. URL: http://naas.gov.ua/content/ publichna-informaciya/ogoloshennya/7393/

Information about the authors:
Voloshanska Svitlana Yaroslavivna,
Candidate of Biological Sciences, Associate Professor,
Associate Professor at the Department of Biology and Chemistry,
Ivan Franko Drohobych State Pedagogical University
24, Ivan Franko street, Drohobych, 82100, Ukraine

Kvasnii Liubov Hryhorivna,
Candidate of Economic Sciences, Associate Professor,
Professor at the Department of Mathematics and Economics, Ivan Franko
Ivan Franko Drohobych State Pedagogical University
24, Ivan Franko street, Drohobych, 82100, Ukraine

Drozd Inesa Fedorivna,
Candidate of Agricultural Sciences, Associate Professor,
Associate Professor,
Ivan Franko Drohobych State Pedagogical University
24, Ivan Franko street, Drohobych, 82100, Ukraine

CHAPTER 4

BACTERIA FROM ENVIRONMENTS WITH EXTREME CONDITIONS AS BIOLOGICAL AGENTS FOR THE DEVELOPMENT OF PREPARATIONS FOR PLANT GROWTH PROMOTION

Hnatush S. O., Komplikevych S. Ya., Maslovska O. D.
DOI https://doi.org/10.30525/978-9934-26-654-6-4

INTRODUCTION

Environmental pollution with heavy metals and other toxicants caused by military actions or intensive human activity is becoming a global problem and poses one of the most serious environmental threats of our time. Such processes lead to the degradation of natural habitats, disruption of biogeochemical cycles, and a significant reduction in areas suitable for agricultural use[1, 2].

According to the Ministry of Economy, Environment, and Agriculture of Ukraine, the russian-Ukrainian war has caused the greatest ecological disaster in modern European history. Among the key destructive factors are massive explosions of artillery shells and rockets, large-scale fires, particularly at oil depots and industrial facilities, as well as uncontrolled leaks of hazardous chemicals[3]. It has been proven that explosive substances and combustion products significantly alter the physical and chemical properties of soils, contributing to their compaction, reduction in humus content, and biological activity, as well as the accumulation of toxic elements[4, 5].

---

[1] Alloway B. J. Heavy metals in soils: trace metals and metalloids in soils and their bioavailability. 3rd ed. Dordrecht : Springer, 2013. 614 p. https://doi.org/10.1007/978-94-007-4470-7

[2] Wuana R. A., Okieimen F. E. Heavy metals in contaminated soils: a review of sources, chemistry, risks and best available strategies for remediation. *ISRN Ecology*. 2011. Vol. 2011. Article ID 402647. 20 p. https://doi.org/10.5402/2011/402647

[3] Ukraine and the UK officially legally consolidated the abolition of import duties and tariff quotas in bilateral trade : [news] / Ministry of Economy of Ukraine. URL: https://me.gov.ua/News/Detail/29b4233b-e60e-4224-ae2e-81b5a7e62cdc?lang=en-GB (дата звернення: 30.12.2025).

[4] Certini G., Nocentini C., Knicker H., Arfaioli P., Rumpel C. Wildfire effects on soil organic matter quantity and quality in two Mediterranean pine forests. *Geoderma*. 2021. Vol. 385. Article 114918. https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2020.114918

[5] Broomandi P., Guney M., Kim J. R., Karaca F. Soil contamination in areas impacted by military activities: A critical review. *Sustainability*. 2020. Vol. 12, Art. 9002. https://doi.org/10.3390/su12219002

Elevated concentrations of copper, lead, nickel, as well as products of incomplete combustion of hydrocarbons, sulfur, and nitrogen compounds, which have high migration capacity and toxicity to living organisms, have already been recorded in the combat zone. The toxic effects of heavy metals are due to their cumulative nature and long half-life, which causes them to accumulate in soils and subsequently enter plants and aquatic ecosystems[6].

According to the State Environmental Inspectorate of Ukraine, the total environmental damage caused by the war has reached 6.01 trillion hryvnia, based on the latest estimates[7]. The accumulation of toxic substances in soil, water, and air poses long-term risks to food security and public health, as hazardous compounds can be transmitted through food chains and cause chronic toxicosis, mutagenic, and carcinogenic effects[8, 9].

The search for effective tools to mitigate the consequences of large-scale human-made and military pollution of the environment necessitates a comprehensive study of microorganisms capable of functioning under conditions of intense environmental stress. In this context, extreme biotopes are of particular scientific and practical value, as they are considered a promising source of microbial strains with unique properties formed as a result of prolonged adaptation to unfavorable living conditions.

The main stress factors in such environments are high concentrations of organic and inorganic toxicants, in particular petroleum products, explosives and their transformation products, as well as heavy metals in high concentrations. In addition, extreme biotopes are often characterized by high salinity, nutrient deficiency, sharp temperature fluctuations, and intense ultraviolet radiation, which further complicates the viability of biota.

The ability of microorganisms to withstand the combined effects of these stresses is due to the presence of specific physiological, biochemical, and genetic adaptation mechanisms, including detoxification systems, metal-binding proteins, antioxidant protection, and effective DNA repair

---

[6] Kabata-Pendias A. Trace elements in soils and plants. 4th ed. Boca Raton : CRC Press, 2011. 548 p. https://doi.org/10.1201/b10158

[7] Оновлена щотижнева інфографіка про збитки, завдані довкіллю внаслідок збройної агресії рф станом на 26.12.2025 : [новина] / Державна екологічна інспекція України. 2025. 29 груд. URL: https://www.dei.gov.ua/post/onovlena-shchotizhneva-infografika-pro-zbitki-zavdani-dovkillyu-26-12-2025 (дата звернення: 30.12.2025).

[8] Jaishankar M., Tseten T., Anbalagan N., Mathew B. B., Beeregowda K. N. Toxicity, mechanism and health effects of some heavy metals. *Interdisciplinary Toxicology*. 2014. Vol. 7. No. 2. P. 60–72. https://doi.org/10.2478/intox-2014-0009

[9] Sharma A., Adhikari B., Shrestha M. [et al.]. Evaluation of heavy metals in vegetables from contaminated agricultural soils of Madhyapur Thimi, Bhaktapur District, Nepal and their potential health risk assessment. *International Journal of Applied Sciences and Biotechnology*. 2022. Vol. 10. No. 3. P. 149–163. https://doi.org/10.3126/ijasbt.v10i3.48703

mechanisms. These adaptive properties ensure their competitiveness and stable survival in unfavorable conditions, and also determine their potential for use in biotechnological approaches to remediate contaminated soils and aquatic ecosystems.

In the context of increasing anthropogenic pressure on ecosystems, developing soil bioremediation strategies is a priority task that involves using microorganisms resistant to a wide range of toxic substances. The use of plant growth-promoting microorganisms is considered an effective and environmentally safe alternative for intensifying the productivity of agroecosystems and increasing plant resistance to negative environmental factors[10].

The aim of our work was to analyze the plant growth-promoting effect of bacterial strains resistant to environmental factors, which differ significantly in terms of metabolism type and oxygen requirements.

1. Characteristics of the bacteria used in the study

The studied strains of microorganisms we isolated from biotopes with different physicochemical characteristics. In particular, *Rhodopseudomonas yavorovii* IMV B-7620 bacteria were isolated from Lake Yavorivske, the water of which contained elevated levels of sulfur compounds and metal ions, including Mn(II), Cd(II), Pb(II), and Fe(III), during the period of strain isolation[11]. Lake Yavorivske was formed on the former site of a sulfur quarry. This is Ukraine's largest artificial lake, measured by both depth and volume of water. *R. yavorovii* IMV B-7620 is characterized by flexible metabolism. They can be heterotrophs or autotrophs, depending on lighting conditions, oxygen supply, carbon sources, and electron donors, and are resistant to cobalt(II) chloride, ferric citrate, copper(II) chloride, potassium dichromate[12]. As a result of the formation of lipid peroxidation products under the influence of ferric citrate and cobalt(II) chloride, antioxidant defense enzymes are activated in the cells of these bacteria, which, in combination with other defense strategies, in particular non-enzymatic antioxidants, ensure the

[10] Wang C. Mechanisms on salt tolerant of *Paenibacillus polymyxa* SC2 and its growth-promoting effects on maize seedlings under saline conditions / C. Wang, J. Pei, H. Li et al. *Microbiological Research*. 2024. Vol. 282. Art. № 127639. https://doi.org/10.1016/j.micres.2024.127639

[11] Мороз О. М. Сульфідогенна активність сульфатвідновних та сірковідновних бактерій за впливу сполук металів / О. М. Мороз, С. О. Гнатуш, О. В. Тарабас, Х. І. Богославець, Г. В. Яворська, Б. М. Борсукевич. *Biosystems Diversity*. 2018. Vol. 26, № 1. С. 3–10. https://doi.org/10.15421/011801

[12] Komplikevych S. Changes in the pigment composition of *Rhodopseudomonas yavorovii* IMV B-7620 under the influence of heavy metal salts / S. Komplikevych, O. Maslovska, A. Halushka, S. Hnatush. *Мікробіологія і біотехнологія*. 2024. № 1. С. 6–21. https://doi.org/10.18524/2307-4663.2024.1(60).297340

survival of bacteria under these conditions[13]. Under the influence of ferric citrate, cobalt(II) chloride, copper(II) chloride, and potassium dichromate in the cells of *R. yavorovii* IMV B-7620, changes the qualitative and quantitative composition of photosynthetic pigments (lycopene, anhydrorhodovibrin, bacteriochlorophyll *a*)[14].

Ochrobactrum rhizosphaerae IMV B-7956 isolated from the filtrates of the Lviv solid waste landfill – wastewater containing a complex of organic and inorganic toxicants, the concentration of which exceeds the norm by 5–50 times[15, 16]. *O. rhizosphaerae* IMV B-7956 bacteria synthesize siderophores and auxin-like compounds, are characterized by phosphatase activity, and metabolize a wide range of organic carbon sources. *O. rhizosphaerae* IMV B-7956 bacteria can metabolize compounds in wastewater from an alcohol production plant, reducing chemical oxygen demand by 55 % in four days. These bacteria are resistant to 15 % NaCl and a variety of heavy metal compounds (cadmium chloride, ferrous sulfate, copper(II) chloride, potassium dichromate, manganese(II) chloride, cobalt(II) chloride)[17]. The bacteria *Paenibacillus tundrae* IMV B-7915 were isolated from a sample of Antarctic substrate. In Antarctic conditions, microorganisms are exposed to low temperatures, UV radiation, elevated metal content, among other factors[18, 19]. *P. tundrae* IMV B-7915 are spore-forming microorganisms capable of growing in a temperature range of

---

[13] Hnatush S. O. Influence of cobalt chloride and ferric citrate on purple non-sulfur bacteria *Rhodopseudomonas yavorovii* / S. O. Hnatush, O. D. Maslovska, S. Y. Komplikevych, I. V. Kovbasa. *Biosystems Diversity*. 2022. Vol. 30, № 1. P. 31–38. https://doi.org/10.15421/012204

[14] Komplikevych S. Changes in the pigment composition of *Rhodopseudomonas yavorovii* IMV B-7620 under the influence of heavy metal salts / S. Komplikevych, O. Maslovska, A. Halushka, S. Hnatush. *Мікробіологія і біотехнологія.* 2024. № 1. С. 6–21. https://doi.org/10.18524/2307-4663.2024.1(60).297340

[15] Popovych V. Migration of hazardous components of municipal landfill leachates into the environment / V. Popovych, J. Telak, O. Telak et al. *Journal of Ecological Engineering.* 2020. Vol. 21, № 1. P. 52–62. https://doi.org/10.12911/22998993/113246

[16] Malovanyy M. Optimal pre-treatment of moderately old landfill leachate at the pilot-scale treatment plant using the combined aerobic biochemical and reagent method / M. Malovanyy, V. Zhuk, I. Tymchuk et al. *Heliyon*. 2023. Vol. 9, № 6. Art. № e16695. https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2023.e16695

[17] Свідоцтво про депонування штаму бактерій *Ochrobactrum rhizosphaerae* К-3 у Депозитарії Інституту мікробіології і вірусології ім. Д. К. Заболотного НАН України з наданням реєстраційного номеру *Ochrobactrum rhizosphaerae* IMB B-7956 / С. О. Гнатуш, О. М. Мороз, О. Д. Масловська, С. Я. Комплікевич. 2021.

[18] Parnikoza I. Soils of the Argentine islands, Antarctica: diversity and characteristics / I. Parnikoza, E. Abakumov, S. Korsun et al. *Polarforschung*. 2017. Vol. 86, № 2. P. 83–96.

[19] Komplikevych S. Culturable microorganisms of substrates of terrestrial plant communities of the Maritime Antarctic (Galindez Island, Booth Island) / S. Komplikevych, O. Maslovska, T. Peretyatko et al. *Polar Biology.* 2023. Vol. 46. P. 1–19. https://doi.org/10.1007/s00300-022-03103-7

2–37 °C, which ensures their resistance under unfavorable conditions. These microorganisms are characterized by cellulase, amylase, and lipase activities, are capable of synthesizing siderophores and auxin-like compounds, fixing molecular nitrogen, and are resistant to cadmium chloride, ferrous sulfate, copper(II) chloride, potassium dichromate, manganese(II) chloride, and cobalt(II) chloride[20]. The bacteria *O. rhizosphaerae* IMV B-7956 and *P. tundrae* IMV B-7915 are capable of accumulating copper ions in cells. After one hour of incubation in Tris-HCl buffer with different concentrations of copper(II) chloride, 2.3–7.8 mg Cu/g biomass (*O. rhizosphaerae* IMB B-7956) and 1.5–3.4 mg Cu/g biomass (*P. tundrae* IMB B-7915) were detected in the cells[21, 22]. As a result of the loading of these bacterial cells with copper(II) ions, the content of the products of lipid peroxidation and oxidative modification of proteins increases in the cells, and the activity of the enzymes of the antioxidant defense system (catalase, superoxide dismutase, glutathione system enzymes), and bacteria produce more exopolysaccharides compared to the control[23, 24].

The studied microorganisms differ significantly in terms of metabolism type and physiological needs, ranging from autotrophy in *R. yavorovii* IMV B-7620 to aerobic and microaerophilic heterotrophic growth in *O. rhizosphaerae* IMV B-7956 and *P. tundrae* IMV B-7915, respectively[25, 26, 27.]

---

[20] Гнатуш С. О. Свідоцтво про депонування штаму бактерій *Paenibacillus tundrae* 5А–101 у Депозитарії Інституту мікробіології і вірусології ім. Д. К. Заболотного НАН України з наданням реєстраційного номеру *Paenibacillus tundrae* IMB B-7915 / С. О. Гнатуш, Т. Б. Перетятко, О. М. Мороз, О. Д. Масловська, С. Я. Комплікевич. 2020.

[21] Komplikevych S. Adaptations of the antarctic bacterium *Paenibacillus tundrae* IMV B-7915 to copper (II) chloride exposure / S. Komplikevych, O. Maslovska, T. Moravska et al. *Ukrainian Antarctic Journal*. 2023. № 2 (21). P. 66–78. https://doi.org/10.33275/1727-7485.1.2023.707

[22] Komplikevych S. Adaptation of *Ochrobactrum rhizosphaerae* IMV B-7956 bacteria to the effect of copper (II) chloride / S. Komplikevych, O. Maslovska, T. Moravska et al. *Mikrobiolohichnyi Zhurnal*. 2024. Vol. 86, № 3. P. 58–69. https://doi.org/10.15407/microbiolj86.03.058

[23] Komplikevych S. Adaptations of the antarctic bacterium *Paenibacillus tundrae* IMV B-7915 to copper (II) chloride exposure / S. Komplikevych, O. Maslovska, T. Moravska et al. *Ukrainian Antarctic Journal*. 2023. № 2 (21). P. 66–78. https://doi.org/10.33275/1727-7485.1.2023.707

[24] Komplikevych S. Adaptation of *Ochrobactrum rhizosphaerae* IMV B-7956 bacteria to the effect of copper (II) chloride / S. Komplikevych, O. Maslovska, T. Moravska et al. *Mikrobiolohichnyi Zhurnal*. 2024. Vol. 86, № 3. P. 58–69. https://doi.org/10.15407/microbiolj86.03.058

[25] Тарабас О. В. Свідоцтво про депонування штаму бактерій *Rhodopseudomonas yavorovii* Ya-2016 у Депозитарії Інституту мікробіології і вірусології ім. Д. К. Заболотного НАН України з наданням реєстраційного номеру *Rhodopseudomonas yavorovii* IMB B-7620 / О. В. Тарабас, С. О. Гнатуш, О. М. Мороз, Б. О. Осташ. 2017.

[26] Свідоцтво про депонування штаму бактерій *Ochrobactrum rhizosphaerae* К-3 у Депозитарії Інституту мікробіології і вірусології ім. Д. К. Заболотного НАН України з наданням реєстраційного номеру *Ochrobactrum rhizosphaerae* IMB B-7956 / С. О. Гнатуш, О. М. Мороз, О. Д. Масловська, С. Я. Комплікевич. 2021.

Such metabolic plasticity and natural resistance to stress factors became the basis for further study of their potential in agrobiotechnology.

2. The effect of bacteria resistant to environmental factors on the growth of wheat seedlings

Microbial preparations are widely used today for pre-sowing seed treatment or spraying of growing plants. Their action is aimed at optimizing mineral nutrition, since it is known that microorganisms can promote plant growth by facilitating the bioavailability of nutrients and macroelements (potassium, phosphorus, nitrogen, iron, zinc, copper) in the rhizosphere. Another important aspect is the ability of plant growth-promoting microorganisms to produce a wide range of phytohormones, other biologically active substances, synthesize hydrolytic enzymes, and enzymes of the antioxidant defense system (catalase, superoxide dismutase). This leads to increased plant resistance to phytopathogens, higher yields, and improved quality indicators for agricultural products, as well as enhanced plant adaptability to extreme biotope conditions, and contributes to the revitalization and preservation of soil fertility[28, 29, 30, 31, 32, 33, 34]. The integration of plant growth-promoting microorganisms into plant cultivation technology allows for a significant reduction in the use of mineral fertilizers, synthetic pesticides, and other

[27] Гнатуш С. О. Свідоцтво про депонування штаму бактерій *Paenibacillus tundrae* 5А–101 у Депозитарії Інституту мікробіології і вірусології ім. Д. К. Заболотного НАН України з наданням реєстраційного номеру *Paenibacillus tundrae* IMB B-7915 / С. О. Гнатуш, Т. Б. Перетятко, О. М. Мороз, О. Д. Масловська, С. Я. Комплікевич. 2020.

[28] Kyrychenko O. V. Market analysis and microbial biopreparations creation for crop production in Ukraine. *Biotechnologia Acta*. 2015. Vol. 8, № 4. P. 40–52. https://doi.org/10.15407/biotech8.04.040

[29] Backer R. Plant growth-promoting rhizobacteria: context, mechanisms of action, and roadmap to commercialization of biostimulants for sustainable agriculture / R. Backer, J. S. Rokem, G. Ilangumaran et al. *Frontiers in Plant Science*. 2018. Vol. 9. Art. № 1473. https://doi.org/10.3389/fpls.2018.01473

[30] Khan S. T. Consortia-based microbial inoculants for sustaining agricultural activities. *Applied Soil Ecology*. 2022. Vol. 176. Art. № 104503. https://doi.org/10.1016/j.apsoil.2022.104503

[31] Zhao D. Isolation and genome sequence of a novel phosphate-solubilizing rhizobacterium *Bacillus altitudinis* GQYP101 and its effects on rhizosphere microbial community structure and functional traits of corn seedling / D. Zhao, Y. Ding, Y. Cui et al. *Current Microbiology*. 2022. Vol. 79, № 9. Art. № 249. https://doi.org/10.1007/s00284-022-02944-z

[32] Ahmad M. Combating iron and zinc malnutrition through mineral biofortification in maize through plant growth promoting *Bacillus* and *Paenibacillus species* / M. Ahmad, A. Hussain, A. Dar et al. *Frontiers in Plant Science*. 2023. Vol. 13. Art. № 1094551. https://doi.org/10.3389/fpls.2022.1094551

[33] Asghar I. Plant growth promotion and nutrient mobilization by indigenous bacteria from soil under long term wheat and maize cultivation in district Bhimber / I. Asghar, M. Ahmed, I. Gul et al. *Pakistan Journal of Agricultural Sciences*. 2023. Vol. 60, № 1.

[34] Mourouzidou S. Introducing the power of plant growth promoting microorganisms in soilless systems: A promising alternative for sustainable agriculture / S. Mourouzidou, G. K. Ntinas, A. Tsaballa, N. Monokrousos. *Sustainability*. 2023. Vol. 15, № 7. Art. № 5959. https://doi.org/10.3390/su15075959

agrochemicals[35]. Wheat (Triticum aestivum L.) is a strategic food crop in Ukraine and the primary source of grain for the world's population. However, its productivity is significantly limited by the influence of biotic and abiotic stressors[36, 37, 38, 39, 40, 41, 42]. In view of this, it is important to develop complex biological products based on non-pathogenic strains of bacteria that are resistant to environmental factors, particularly in conditions of anthropogenic stress. This will not only stimulate plant growth and increase yields, but also minimize ecotoxicological risks to humans. In particular, the use of metal-resistant strains can help reduce the accumulation of heavy metals in plant biomass and grain, thereby preventing them from entering the food chain[43, 44]. Replacing agrochemicals with bacterial preparations reduces the

[35] Ahmad M. Combating iron and zinc malnutrition through mineral biofortification in maize through plant growth promoting *Bacillus* and *Paenibacillus* species / M. Ahmad, A. Hussain, A. Dar et al. *Frontiers in Plant Science*. 2023. Vol. 13. Art. № 1094551. https://doi.org/10.3389/fpls.2022.1094551

[36] Parlak K. U. Effect of nickel on growth and biochemical characteristics of wheat (*Triticum aestivum* L.) seedlings. *NJAS-Wageningen Journal of Life Sciences*. 2016. Vol. 76. P. 1–5. https://doi.org/10.1016/j.njas.2012.07.001

[37] Ali Z. Deciphering adverse effects of heavy metals on diverse wheat germplasm on irrigation with urban wastewater of mixed municipal-industrial origin / Z. Ali, A. Mujeeb-Kazi, U. M. Quraishi, R. N. Malik. *Environmental Science and Pollution Research*. 2018. Vol. 25. P. 18462–18475. https://doi.org/10.1007/s11356-018-1996-0

[38] Hussain H. A. Chilling and drought stresses in crop plants: implications, cross talk, and potential management opportunities / H. A. Hussain, S. Hussain, A. Khaliq et al. *Frontiers in Plant Science.* 2018. Vol. 9. Art. № 393. https://doi.org/10.3389%2Ffpls.2018.00393

[39] Ding Y., Shi Y., Yang S. Advances and challenges in uncovering cold tolerance regulatory mechanisms in plants. *New Phytologist*. 2019. Vol. 222, № 4. P. 1690–1704. https://doi.org/10.1111%2Fnph.15696

[40] Saleh S. R. Wheat biological responses to stress caused by cadmium, nickel and lead / S. R. Saleh, M. M. Kandeel, D. Ghareeb et al. *Science of The Total Environment.* 2020. Vol. 706. Art. № 136013. https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2019.136013

[41] Hassan M. A. Cold stress in wheat: plant acclimation responses and management strategies / M. A. Hassan, C. Xiang, M. Farooq et al. *Frontiers in Plant Science*. 2021. Vol. 12. Art. № 676884. https://doi.org/10.3389%2Ffpls.2021.676884

[42] Abdullah M. Potential of psychrotolerant rhizobacteria for the growth promotion of wheat (*Triticum aestivum* L.) / M. Abdullah, M. Tariq, S. T. Zahra, A. Ahmad, M. Zafar, S. Ali. *PeerJ*. 2023. Vol. 11. Art. № e16399. https://doi.org/10.7717/peerj.16399

[43] Бондарева О. Б., Вінюков О. О., Коноваленко Л. І. Застосування мікробних препаратів і регуляторів росту рослин для зниження накопичення важких металів у зерні пшениці озимої. *Аграрні інновації*. 2021. № 5. С. 12–16. https://doi.org/10.32848/agrar.innov.2021.5.2

[44] Yu X. An indoleacetic acid-producing *Ochrobactrum* sp. MGJ11 counteracts cadmium effect on soybean by promoting plant growth / X. Yu, Y. Li, Y. Cui et al. *Journal of Applied Microbiology*. 2017. Vol. 122, № 4. P. 987–996. https://doi.org/10.1111/jam.13379

overall environmental impact of pesticides and chemical fertilizers, directly improving the quality of life and health of the population[45].

Heterotrophic bacteria *P. tundrae* IMV B-7915 and *O. rhizosphaerae* IMV B-7956 were grown on tryptic soy agar medium for 3 days, and photosynthetic bacteria *R. yavorovii* IMV B-7620 were grown on ATCC No. 1449 mineral medium for 7 days under 200 lx illumination. Wheat seeds of the cultivar Tubalt were soaked for 18 hours in a bacterial suspension (suspension density 5.0 according to McFarland) in a 0.9 % NaCl solution. The control was wheat seeds soaked for 18 hours in a 0.9 % NaCl solution. The seeds were planted into the soil and sprinkled with tap water. Wheat was grown for 8 days at 16–18 °C.

Improvements in plant development are usually characterized by improved seed germination, increased amounts of both above-ground and below-ground plant parts, chlorophyll content, and yield, and flower and/or fruit size[46].

In our study, the effect of seed bacterization with bacterial suspensions was assessed based on its impact on seed germination[47], the length of roots and shoots of 8-day-old seedlings, and the chlorophyll content in their leaves. Bacterization of wheat seeds with suspensions of the studied bacteria had a predominantly positive effect on seed germination (Table 1). In particular, seed germination rates in the experimental variants exceeded those of the control on both the third and eighth days of wheat growth. The most pronounced stimulating effect was found for *P. tundrae* IMV B-7915, which increased germination by 21 % and 10 % on the 3rd and 8th days of seedling growth, respectively. Additionally, under the influence of this strain of bacteria, the dry weight of the seedlings increased slightly (Table 1), whereas in variants with other bacteria, the moisture and dry weight indicators remained at the control level under these conditions.

[45] Ahmad M. Combating iron and zinc malnutrition through mineral biofortification in maize through plant growth promoting *Bacillus* and *Paenibacillus species* / M. Ahmad, A. Hussain, A. Dar et al. *Frontiers in Plant Science*. 2023. Vol. 13. Art. № 1094551. https://doi.org/10.3389/fpls.2022.1094551

[46] Woo S. L. Microbial consortia: promising probiotics as plant biostimulants for sustainable agriculture / S. L. Woo, O. Pepe. *Frontiers in Plant Science*. 2018. Vol. 9. Art. № 1801. https://doi.org/10.3389/fpls.2018.01801

[47] Насіння сільськогосподарських культур. Методи визначення якості : ДСТУ 4138-2002 [Чинний від 2003–01–01]. Київ : Держспоживстандарт України, 2003. 173 с. (Державний стандарт України).

Table 1

Seed germination and dry weight accumulation of *Triticum aestivum* wheat seedlings of the cultivar Tybalt, the seeds of which were treated with bacteria *Rhodopseudomonas yavorovii* IMV B-7620, *Paenibacillus tundrae* IMV B-7915, *Ochrobactrum rhizosphaerae* IMV B-7956

Bacterial strains	Seed germination, %		Moisture, %	Plant dry weight, %
	3 day	8 day		
Control	69 ± 5	89 ± 4	88.37 ± 0.87	11.62 ± 0.87
O. rhizosphaerae IMV B-7956	78 ± 4	94 ± 3	87.94 ± 0.52	12.06 ± 0.52
P. tundrae IMV B-7915	90 ± 5	99 ± 3	86.49 ± 0.34	13.51 ± 0.34
R. yavorovii IMV B-7620	78 ± 9	85 ± 8	88.86 ± 0.24	11.14 ± 0.24

Bacterization of seeds with suspensions of *P. tundrae* IMV B-7915 or *R. yavorovii* IMV B-7620 resulted in a statistically significant elongation of shoots and roots of seedlings by 3 % and 16 %, respectively (Fig. 1).

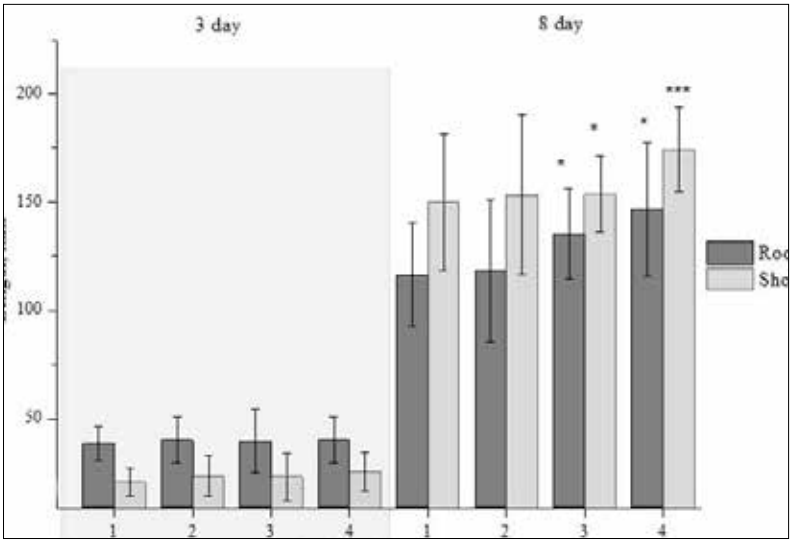


Fig. 1. Root length and shoot height of wheat seedlings the seeds of which were treated with bacteria *Rhodopseudomonas yavorovii* IMV B-7620, *Paenibacillus tundrae* IMV B-7915, *Ochrobactrum rhizosphaerae* IMV B-7956:

1 – control; 2 – *O. rhizosphaerae* IMV B-7956; 3 – *P. tundrae* IMV B-7915; 4 – *R. yavorovii* IMV B-7620 (x±SD, * – $p < 0.05$, *** – $p<0.001$ – probable differences in root or shoot length compared to the control)

Morphological changes in the root system increase the area of contact with the soil, facilitating access to nutrients and their transport to plant organs. Due to the sustainable assimilation of nitrogen, phosphorus, potassium, and microelements, growth processes are activated, which ensures an increase in plant biomass[48]. The total chlorophyll content and chlorophyll *a* content in the leaves of 8-day-old wheat seedlings increased by 15–25 % when wheat seeds were treated with *P. tundrae* IMV B-7915 and *O. rhizosphaerae* IMV B-7956 bacteria (Fig. 2).

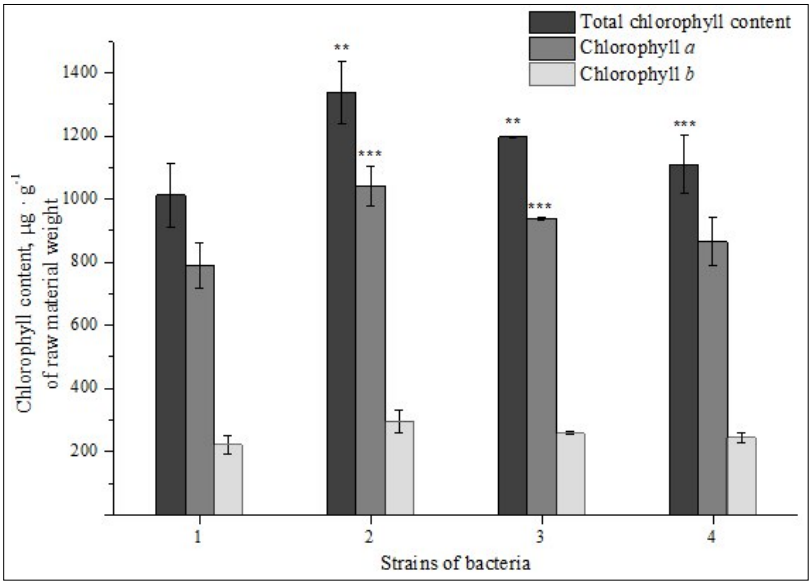


Fig. 2. Chlorophyll content in the leaves of 8-day-old wheat seedlings, the seeds of which were treated with bacteria *Rhodopseudomonas yavorovii* IMV B-7620, *Paenibacillus tundrae* IMV B-7915, *Ochrobactrum rhizosphaerae* IMV B-7956:

1 – control; 2 – *O. rhizosphaerae* IMV B-7956; 3 – *P. tundrae* IMV B-7915; 4 – *R. yavorovii* IMV B-7620 (x±SD, ** – $p < 0.01$, *** – $p<0.001$ – probable differences in chlorophyll content compared to the control)

It has been established that among the strains studied in monoculture, *P. tundrae* IMV B-7915 has the most pronounced stimulating effect on seed

[48] Woo S. L. Microbial consortia: promising probiotics as plant biostimulants for sustainable agriculture / S. L. Woo, O. Pep et al. *Frontiers in Plant Science*. 2018. Vol. 9. Art. № 1801. https://doi.org/10.3389/fpls.2018.01801

germination and wheat seedling development. The data we obtained are consistent with the information available in the literature regarding the high growth-promoting potential of representatives of the genera to which the selected strains belong[49, 50, 51].

In particular, it is known that bacteria of the genus *Ochrobactrum* are capable not only of intensifying the growth of agricultural crops, but also of neutralizing the toxic effects of heavy metals. For example, *Ochrobactrum* sp. MGJ11 stimulates soybean growth at the same time, reducing the negative impact of cadmium on the root system of these plants[52], and *Ochrobactrum* sp. Pv2Z2 promotes an increase in bean biomass and optimizes nitrogen assimilation compared to non-inoculated plants[53].

The plant growth-promoting effect of *Rhodopseudomonas palustris* strains has been described for various model plants. Bacterization of cucumber seeds with bacteria *R. palustris* G5 improves seedling growth parameters and stimulates induced systemic resistance under salt stress conditions[54]. The use of *R. palustris* SC06 reduces cadmium translocation into rice tissues during growth on contaminated soil[55]. With prolonged (5 years) application

[49] Zakry F. A. A. Isolation and plant growth-promoting properties of rhizobacterial diazotrophs from pepper vine (Piper nigrum L.) / F. A.A. Zakry, M. S. Halimi, K. B. Abdul Rahim et al. *Malaysian Applied Biology Journal*. 2010. Vol. 39, № 2. P. 41–45.

[50] Asghar I. Plant growth promotion and nutrient mobilization by indigenous bacteria from soil under long term wheat and maize cultivation in district Bhimber / I. Asghar, M. Ahmed, I. Gul et al. *Pakistan Journal of Agricultural Sciences*. 2023. Vol. 60, № 1.

[51] Dilshad R. In vitro and in silico study for plant growth promotion potential of indigenous *Ochrobactrum* ciceri and *Bacillus australimaris* / R. Dilshad, S. Mazhar, S. Munir et al. *Open Agriculture*. 2023. Vol. 8, № 1. Art. № 20220238. https://doi.org/10.1515/opag-2022-0238

[52] Yu X. An indoleacetic acid-producing *Ochrobactrum sp*. MGJ11 counteracts cadmium effect on soybean by promoting plant growth / X. Yu, Y. Li, Y. Cui et al. *Journal of Applied Microbiology*. 2017. Vol. 122, № 4. P. 987–996. https://doi.org/10.1111/jam.13379

[53] Imran A. Ochrobactrum sp. Pv2Z2 exhibits multiple traits of plant growth promotion, biodegradation and N-acyl-homoserine-lactone quorum sensing / A. Imran, M. J. A. Saadalla, S. U. Khan, M. S. Mirza, K. A. Malik, F. Y. Hafeez. *Annals of Microbiology.* 2014. Vol. 64. P. 1797–1806. https://doi.org/10.1007/s13213-014-0824-0

[54] Ge H. Growth-promoting ability of *Rhodopseudomonas palustris* G5 and its effect on induced resistance in cucumber against salt stress / H. Ge, F. Zhang. *Journal of Plant Growth Regulation*. 2019. Vol. 38, № 1. P. 180–188. https://doi.org/10.1007/s00344-018-9825-8

[55] Su Y. Rhodopseudomonas palustris shapes bacterial community, reduces Cd bioavailability in Cd contaminated flooding paddy soil, and improves rice performance / Y. Su, Q. Shi, Z. Li et al. *Science of The Total Environment.* 2024. Vol. 926. Art. № 171824. https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2024.171824

of *R. palustris* ISP-1, peanut yield increased by 12.5 %[56, 57], and strain *R. palustris* GJ-22 promoted the growth of *Nicotiana benthamiana* and increased resistance to tobacco mosaic virus[58].

The modern market for biological products in Ukraine offers a wide range of products for various groups of agricultural crops (cereals, legumes, industrial crops, etc.). They usually contain live cultures of microorganisms, often in combination with their metabolic products, biologically active substances, and microelements in chelated form[59].

Specialists pay particular attention to bacteria of the genus *Paenibacillus*. Based on the *P. polymyxa* KB strain, the preparation "Polymyxobacterin" was developed (Institute of Agricultural Microbiology and Agroindustrial Production of the National Academy of Agrarian Sciences). Its use intensifies the development of nitrogen-fixing microbiota in the rhizosphere of winter wheat[60], increases grain yield and quality (protein and gluten content) on different soil types[61, 62]. An important characteristic of this strain is its protective effect against the toxic effects of lead and cadmium[63].

---

[56] Wang Y. The long-term effects of using phosphate-solubilizing bacteria and photosynthetic bacteria as biofertilizers on peanut yield and soil bacteria community / Y. Wang, S. Peng, Q. Hua et al. *Frontiers in Microbiology*. 2021. Vol. 12. Art. № 693535. https://doi.org/10.3389/fmicb.2021.693535

[57] Pandit B. Microbial biofertilizers: bioresources and eco-friendly technologies for agricultural and environmental sustainability. *Science and Culture.* 2024. Vol. 90, № 3–4. P. 92–100. https://doi.org/10.36094/sc.v89.2024.Microbial_Biofertilizers_Bioresources.Pandit.92

[58] Enebe M. C. The impact of microbes in the orchestration of plants' resistance to biotic stress: a disease management approach / M. C. Enebe, O. O. Babalol et al. *Applied Microbiology and Biotechnology*. 2019. Vol. 103, № 1. P. 9–25. https://doi.org/10.1007/s00253-018-9433-3

[59] Kyrychenko O. V. Market analysis and microbial biopreparations creation for crop production in Ukraine. *Biotechnologia Acta*. 2015. Vol. 8, № 4. P. 40–52. https://doi.org/10.15407/biotech8.04.040

[60] Волкогон К. І. Розвиток мікроорганізмів азотного циклу в ризосфері пшениці озимої під впливом мінеральних добрив та бактеріальних препаратів. *Агроекологічний журнал*. 2013. № 3. С. 95–102.

[61] Ключенко В. В. Вплив мікробних препаратів на продуктівність та якість зерна пшениці озимої в агрокліматичних умовах Степового Криму. *Наукові праці. Екологія*. 2011. Т. 152, № 140. С. 33–36.

[62] Скаржинський В. Ф. Дія Поліміксобактерину на урожайність та якість зерна пшениці озимої в умовах Лісостепу України / В. Ф. Скаржинський, І. С. Брощак, Ю. Т. Федорчак, Л. М. Токмакова. *Сільськогосподарська мікробіологія*. 2011. № 14. С. 121–128.

[63] Бондарева О. Б., Вінюков О. О., Коноваленко Л. І. Застосування мікробних препаратів і регуляторів росту рослин для зниження накопичення важких металів у зерні пшениці озимої. *Аграрні інновації*. 2021. № 5. С. 12–16. https://doi.org/10.32848/agrar.innov.2021.5.2

3. The effect of compositions of resistant to environmental factors strains of bacteria on the morphological and physiological parameters of wheat seedlings

The development of multicomponent complex microbial preparations is a relevant area for modern agrobiotechnology. The use of several types of bacteria in a single preparation requires careful consideration of their ecological and physiological compatibility[64].

Typically, microbial compositions demonstrate higher efficacy and stability compared to individual strains because they are capable of functional complementarity[65]. The combination of two or more plant growth-promoting microorganisms can promote plant growth, combat stress, and control pathogens[66]. After the combined application of *Bradyrhizobium japonicum* (TAL-378 and TAL-379) and phosphate-solubilizing *Pseudomonas* sp. for soybean inoculation, the yield of these plants increased[67].

The formation of such associations is based on a detailed analysis of interspecies interactions. The main criteria for selecting cultures are: functional diversity (combination of strains with different types of metabolism and growth stimulation mechanisms); resistance of components to changing environmental conditions (pH, temperature, presence of toxicants); biological compatibility, which prevents the suppression of some cultures by others; the possibility of effective adsorption on the seed coat or stable development in the rhizosphere of plants[68, 69]. The promising application of these compositions

---

[64] Kyrychenko O. V. Market analysis and microbial biopreparations creation for crop production in Ukraine. *Biotechnologia Acta*. 2015. Vol. 8, № 4. P. 40–52. https://doi.org/10.15407/biotech8.04.040

[65] Behera B. Microbial consortia for sustaining productivity of non-legume crops: prospects and challenges / B. Behera, T. K. Das, R. Raj et al. *Agricultural Research*. 2021. Vol. 10, № 1. P. 1–14. https://doi.org/10.1007/s40003-020-00482-3

[66] Olanrewaju O. S. Bacterial consortium for improved maize (Zea mays L.) production / O. S. Olanrewaju, O. O. Babalol et al. *Microorganisms*. 2019. Vol. 7, № 11. Art. № 519. https://doi.org/10.3390/microorganisms7110519

[67] Argaw A. Evaluation of co-inoculation of *Bradyrhizobium japonicum* and phosphate solubilizing *Pseudomonas* sp. effect on soybean (Glycine max L. (Merr.)) in Assossa area. *Journal of Agricultural Research*. 2012. Vol. 14. P. 213–224.

[68] Pellegrini M. Plant growth-promoting bacterial consortia render biological control of plant pathogens: a review / M. Pellegrini, R. Djebaili, G. Pagnani et al. *Sustainable Agrobiology: Design and Development of Microbial Consortia.* 2024. P. 57–74. https://doi.org/10.1007/978-981-19-9570-5_4

[69] Maciel-Rodríguez M. The role of plant growth-promoting bacteria in soil restoration: A strategy to promote agricultural sustainability / M. Maciel-Rodríguez, F. D. Moreno-Valencia, M. Plascencia-Espinos et al. *Microorganisms*. 2025. Vol. 13, № 8. Art. № 1799. https://doi.org/10.3390/microorganisms13081799

is due to their ability to form a stable microbiocenotic system that is more resistant to biotic and abiotic stresses compared to individual strains[70].

Three strains of bacteria resistant to environmental factors were used to form the compositions (Table 2). Before forming the compositions, interspecies interactions were analyzed using an antagonism test. The study found no growth inhibition between any of the strains studied, confirming their biological compatibility.

The most pronounced difference in seed germination between bacterized seeds and controls was observed on the third day of the experiment.

In particular, when using binary compositions of *O. rhizosphaerae* IMV B-7956 and *R. yavorovii* IMV B-7620 (mixture 3), as well as the combination of *O. rhizosphaerae* IMV B-7956 with *P. tundrae* IMV B-7915 (mixture 1), seed germination exceeded 90 % on the third day.

Table 2

Composition of mixtures used in the study

Mixture	Bacterial strains
1	*O. rhizosphaerae* IMV B-7956 + *P. tundrae* IMV B-7915
2	*P. tundrae* IMV B-7915 + *R. yavorovii* IMV B-7620
3	*O. rhizosphaerae* IMV B-7956 + *R. yavorovii* IMV B-7620
4	*O. rhizosphaerae* IMV B-7956 + *P. tundrae* IMV B-7915 + *R. yavorovii* IMV B-7620

By the end of the observation period (8 days), the germination rate in the mixture 1 variant reached 99±1 %. Also, after applying this composition for seed bacterization, the dry weight of seedlings increased (Table 3).

Table 3

Seed germination and dry weight accumulation of *Triticum aestivum* wheat seedlings of the cultivar Tybalt, the seeds of which were treated with bacteria *Rhodopseudomonas yavorovii* IMV B-7620, *Paenibacillus tundrae* IMV B-7915, *Ochrobactrum rhizosphaerae* IMV B-7956

Mixture	Seed germination		Moisture, %	Plant dry weight, %
	3 day	8 day		
Control	69±5	89±4	88.37±0.87	11.62±0.87
1	94±3	99±1	87.04±0.15	12.96±0.15
2	68±2	92±3	88.39±0.31	11.61±0.31
3	92±3	98±3	88.92±0.17	11.08±0.17
4	78±3	88±3	88.87±0.32	11.13±0.32

[70] Maciel-Rodríguez M. The role of plant growth-promoting bacteria in soil restoration: A strategy to promote agricultural sustainability / M. Maciel-Rodríguez, F. D. Moreno-Valencia, M. Plascencia-Espinos et al. *Microorganisms*. 2025. Vol. 13, № 8. Art. № 1799. https://doi.org/10.3390/microorganisms13081799

Data on the morphogenesis of the root system are of particular interest, since the root is the primary organ of contact with the rhizosphere microbiota and ensures the absorption of nutrients. A statistically significant increase in root length of 17 % was recorded after inoculation of wheat seeds with mixture 2 (*P. tundrae* IMV B-7915 + *R. yavorovii* IMV B-7620). The highest root length growth rate (33 %) was achieved with mixture 3 (*O. rhizosphaerae* IMV B-7956 and *R. yavorovii* IMV B-7620) (Fig. 3). These results indicate a pronounced synergistic effect of these strains, which significantly activates the development of the wheat root system in the early stages of growth.

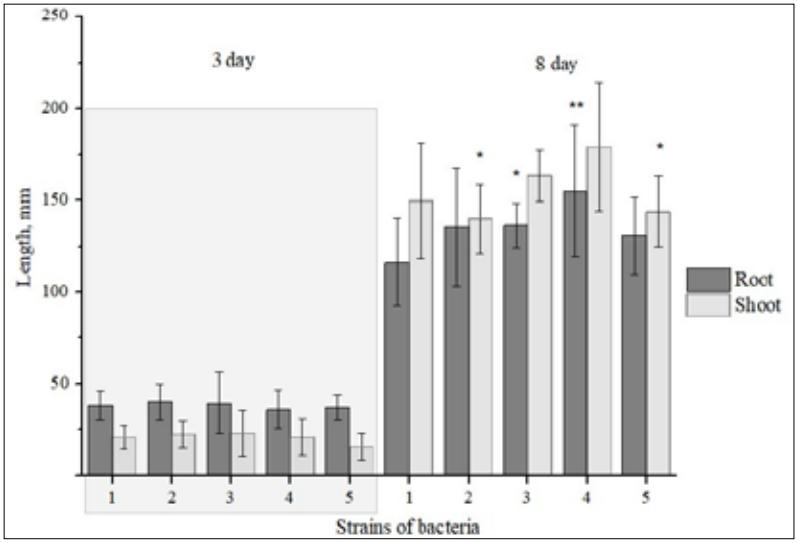


Fig. 3. Root length and shoot height of wheat seedlings, the seeds of which were treated with mixtures:
1 – control; 2 – mixture 1; 3 – mixture 2; 4 – mixture 3, 5 – mixture 4; (x±SD, * – p≤0,05, ** – p≤0,01 – probable diferences in root or shoot length compared to the control)

An important criterion for assessing the physiological state of wheat seedlings under the influence of microbial compositions is the content of photosynthetic pigments. This is due to the fact that about 90 % of plant biomass is formed as a result of CO_2 assimilation, therefore plant growth rates directly depend on the intensity of photosynthesis processes[71].

[71] Kour D. Microbial biofertilizers: Bioresources and eco-friendly technologies for agricultural and environmental sustainability / D. Kour, K. L. Rana, A. N. Yadav et al. *Biocatalysis and Agricultural Biotechnology*. 2020. Vol. 23. Art. № 101487. https://doi.org/10.1016/j.bcab.2019.101487

Increased chlorophyll content not only optimizes photosynthesis, but also contributes to the overall intensification of plant growth[72].

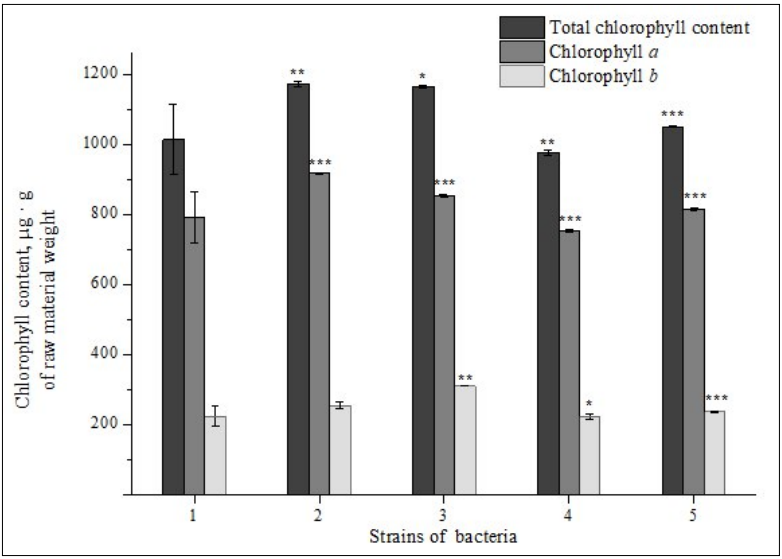


Fig. 4. Chlorophyll content in the leaves of 8-day-old wheat seedlings, the seeds of which were treated with mixtures :

1 – control; 2 – mixture 1; 3 – mixture 2; 4 – mixture 3; 5 – mixture 4, (x±SD, * – p≤0,05, ** – p≤0,01 – probable diferences in chlorophyll content compared to the control)

It was found that the application of mixture 1 (*P. tundrae* IMV B-7915 and *O. rhizosphaerae* IMV B-7956) contributed to an increase in the total chlorophyll and chlorophyll a content in the leaves of 8-day-old seedlings by 16 % compared to the control (Fig. 4). The application of a mixture of *P. tundrae* IMV B-7915 and *R. yavorovii* IMV B-7620 (mixture 2) resulted in an increase in the total chlorophyll content in leaves by 15–34 %, chlorophyll *a* by 8–28 %, and chlorophyll *b* by 39–54 % compared to the control. When *O. rhizosphaerae* IMV B-7956 and *R. yavorovii* IMV B-7620 (mixture 3) were used together, the chlorophyll content in the leaves was slightly lower than in the control.

[72] Sundar L. S. Utilization of *Rhodopseudomonas palustris* in Crop Rotation Practice Boosts Rice Productivity and Soil Nutrient Dynamics / L. S. Sundar, K. S. Yen, Y. T. Chang, Y. Y. Chao. *Agriculture*. 2024. Vol. 14, № 5. Art. № 758. https://doi.org/10.3390/agriculture14050758

The increase in chlorophyll content is considered to be a fundamental mechanism of wheat tolerance to abiotic stresses. Along with indicators such as cell membrane stability and proline accumulation, high pigment levels ensure resistance to moisture deficiency and enable high productivity to be maintained in drought conditions[73, 74, 75, 76]. Since heavy metals are one of the critical factors that inhibit photosynthesis, the ability of the studied bacterial strains to maintain and increase chlorophyll levels, as established by us, is a strong basis for their use in biotechnologies for the restoration of technologically polluted areas.

Although the results of numerous studies confirm that the use of a mixture of plant growth-promoting bacteria is a more effective tool compared to mono-inoculation[77, 78, 79], our data indicate the selective nature of such influence depending on the composition of the mixture. The combined application of the studied strains revealed significant potential for enhancing wheat growth, particularly in terms of root system development and photosynthetic pigment accumulation.

At the same time, further research is needed to move from experimental mixtures to the creation of a targeted bacterial preparation. The primary tasks remain: optimizing the quantitative ratio of cultures in the compositions; establishing a critical cell titer that will ensure stable plant growth-promoting activity; studying the viability of strains in the compositions during long-term storage.

The results obtained provide a scientific basis for the development of complex preparations aimed at increasing the productivity of agroecosystems, particularly under conditions of technogenic stress.

---

[73] Talebi R. Evaluation of chlorophyll content and canopy temperature as indicators for drought tolerance in durum wheat (Triticum durum Desf.). *Australian Journal of Basic and Applied Sciences*. 2011. Vol. 5, № 11. P. 1457–1462.

[74] Naeem M. K. Physiological responses of wheat (*Triticum aestivum* L.) to drought stress / M. K. Naeem, M. Ahmad, M. Kamran et al. *International Journal of Plant & Soil Science.* 2015. Vol. 6, № 1. P. 1–9. https://doi.org/10.9734/IJPSS/2015/9587

[75] Kalaji H. M. Chlorophyll a fluorescence as a tool to monitor physiological status of plants under abiotic stress conditions / H. M. Kalaji, A. Jajoo, A. Oukarroum et al. *Acta Physiologiae Plantarum*. 2016. Vol. 38. P. 1–11. https://doi.org/10.1007/s11738-016-2113-y

[76] Ahmed H. G. M. D. Conferring drought-tolerant wheat genotypes through morpho-physiological and chlorophyll indices at seedling stage / H. G.M. D. Ahmed, Y. Zeng, X. Yang et al. *Saudi Journal of Biological Sciences*. 2020. Vol. 27, № 8. P. 2116–2123. https://doi.org/10.1016/j.sjbs.2020.06.019

[77] Wang J. Beneficial bacteria activate nutrients and promote wheat growth under conditions of reduced fertilizer application / J. Wang, R. Li, H. Zhang et al. *BMC Microbiology*. 2020. Vol. 20. P. 1–12. https://doi.org/10.1186%2Fs12866-020-1708-z

[78] Khan S. T. Consortia-based microbial inoculants for sustaining agricultural activities. *Applied Soil Ecology.* 2022. Vol. 176. Art. № 104503. https://doi.org/10.1016/j.apsoil.2022.104503

[79] Ahmad M. Combating iron and zinc malnutrition through mineral biofortification in maize through plant growth promoting *Bacillus* and *Paenibacillus* species / M. Ahmad, A. Hussain, A. Dar et al. *Frontiers in Plant Science*. 2023. Vol. 13. Art. № 1094551. https://doi.org/10.3389/fpls.2022.1094551

CONCLUSIONS

It has been established that strains of microorganisms resistant to environmental factors *P. tundrae* IMV B-7915, *O. rhizosphaerae* IMV B-7956, and *R. yavorovii* IMV B-7620 have pronounced plant growth-promoting activity on wheat (*Triticum aestivum* L.). In monoculture, the most effective stimulator of wheat seedling growth was the strain *P. tundrae* IMV B-7915, bacterization with which increases seed germination by 21 % and stimulates root growth by 16 %. A synergistic effect was observed when using mixtures of bacterial cultures, as mixtures ensured faster seed germination (germination rate >90 % on the third day) compared to monocultures. Bacterization of wheat seeds with a mixture of two cultures, *O. rhizosphaerae* IMV B-7956 and *R. yavorovii* IMV B-7620, significantly stimulated the growth of seedling roots. Bacterization of seeds with the studied bacteria had a positive effect on the chlorophyll content in the leaves of seedlings. The highest increase in chlorophyll content (by 15–34 %) is provided by compositions based on *P. tundrae* IMV B-7915 and *R. yavorovii* IMV B-7620.

SUMMARY

The current state of agroecosystems is characterized by progressive soil degradation and increasing anthropogenic pressure, particularly heavy metal pollution resulting from industrial activities and military operations. This creates critical abiotic stress for agricultural crops, leading to the suppression of photosynthetic processes, metabolic disorders, and a significant reduction in wheat yields, which poses a threat to global food security. Traditional agricultural technologies often prove ineffective in such extreme conditions, which creates an urgent need for the development of environmentally safe biotechnological agents for plant protection and growth stimulation.

This section presents the results of a study on the effect of three strains of microorganisms resistant to environmental factors (*Rhodopseudomonas yavorovii* IMV B-7620, *Paenibacillus tundrae* IMV B-7915, and *Ochrobactrum rhizosphaerae* IMV B-7956) on the growth and development of wheat seedlings. Seed inoculation with bacterial mixtures promotes germination, stimulates root system development, and increases chlorophyll *a* and *b* accumulation. Synergistic effects were observed when using binary mixtures, resulting in a 33 % increase in root length and a 15–34 % increase in chlorophyll content. The results are of practical importance for the development of complex bacterial preparations designed to enhance the yield of grain crops under conditions of technogenic stress.

Major research was performed and funded under the Ministry of Education and Science of Ukraine project “Development of an approach to restore soil

fertility in soils affected by hostilities using microbial biological preparations" (Grant number 0124U000931). A portion of the work has been completed within the tasks outlined in the State Target Scientific and Technical Research Program in Antarctica for 2011–2025.

The authors are thankful to the private agricultural company "Zahidny Bug" (Lviv region, Ukraine) for sharing wheat seeds of the cultivar Tybalt.

Bibliography

1. Abdullah M. Potential of psychrotolerant rhizobacteria for the growth promotion of wheat (*Triticum aestivum* L.) / M. Abdullah, M. Tariq, S. T. Zahra, A. Ahmad, M. Zafar, S. Ali. *PeerJ.* 2023. Vol. 11. Art. № e16399. https://doi.org/10.7717/peerj.16399

2. Ahmad M. Combating iron and zinc malnutrition through mineral biofortification in maize through plant growth promoting *Bacillus* and *Paenibacillus* species / M. Ahmad, A. Hussain, A. Dar et al. *Frontiers in Plant Science*. 2023. Vol. 13. Art. № 1094551. https://doi.org/10.3389/fpls.2022.1094551

3. Ahmed H. G. M. D. Conferring drought-tolerant wheat genotypes through morpho-physiological and chlorophyll indices at seedling stage / H. G. M. D. Ahmed, Y. Zeng, X. Yang et al. *Saudi Journal of Biological Sciences.* 2020. Vol. 27, № 8. P. 2116–2123. https://doi.org/10.1016/j.sjbs.2020.06.019

4. Ali Z. Deciphering adverse effects of heavy metals on diverse wheat germplasm on irrigation with urban wastewater of mixed municipal-industrial origin / Z. Ali, A. Mujeeb-Kazi, U. M. Quraishi, R. N. Malik. *Environmental Science and Pollution Research.* 2018. Vol. 25. P. 18462–18475. https://doi.org/10.1007/s11356-018-1996-0

5. Alloway B. J. Heavy metals in soils: trace metals and metalloids in soils and their bioavailability. 3rd ed. Dordrecht : Springer, 2013. 614 p. https://doi.org/10.1007/978-94-007-4470-7

6. Argaw A. Evaluation of co-inoculation of *Bradyrhizobium japonicum* and phosphate solubilizing *Pseudomonas* sp. effect on soybean (Glycine max L. (Merr.)) in Assossa area. *Journal of Agricultural Research*. 2012. Vol. 14. P. 213–224.

7. Asghar I. Plant growth promotion and nutrient mobilization by indigenous bacteria from soil under long term wheat and maize cultivation in district Bhimber / I. Asghar, M. Ahmed, I. Gul et al. *Pakistan Journal of Agricultural Sciences*. 2023. Vol. 60, № 1.

8. Backer R. Plant growth-promoting rhizobacteria: context, mechanisms of action, and roadmap to commercialization of biostimulants for sustainable

agriculture / R. Backer, J. S. Rokem, G. Ilangumaran et al. *Frontiers in Plant Science*. 2018. Vol. 9. Art. № 1473. https://doi.org/10.3389/fpls.2018.01473

9. Behera B. Microbial consortia for sustaining productivity of non-legume crops: prospects and challenges / B. Behera, T. K. Das, R. Raj et al. *Agricultural Research*. 2021. Vol. 10, № 1. P. 1–14. https://doi.org/10.1007/s40003-020-00482-3

10. Broomandi P., Guney M., Kim J. R., Karaca F. Soil contamination in areas impacted by military activities: A critical review. *Sustainability*. 2020. Vol. 12, Art. 9002. https://doi.org/10.3390/su12219002

11. Certini G., Nocentini C., Knicker H., Arfaioli P., Rumpel C. Wildfire effects on soil organic matter quantity and quality in two Mediterranean pine forests. *Geoderma*. 2021. Vol. 385. Article 114918. https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2020.114918

12. Dabban I. A. Techniques Used for Screening and Detection of Beneficial *Microorganisms* Used for Production of Nanobiofertilizers / I. A. Dabban, A. B. Bello, A. Amarachi et al. *Handbook of Agricultural Biotechnology.* 2024. P. 315–345. https://doi.org/10.1002/9781394211548.ch13

13. Ding Y., Shi Y., Yang S. Advances and challenges in uncovering cold tolerance regulatory mechanisms in plants. *New Phytologist.* 2019. Vol. 222, № 4. P. 1690–1704. https://doi.org/10.1111%2Fnph.15696

14. Dilshad R. In vitro and in silico study for plant growth promotion potential of indigenous *Ochrobactrum* ciceri and *Bacillus australimaris* / R. Dilshad, S. Mazhar, S. Munir et al. *Open Agriculture.* 2023. Vol. 8, № 1. Art. № 20220238. https://doi.org/10.1515/opag-2022-0238

15. Enebe M. C. The impact of microbes in the orchestration of plants' resistance to biotic stress: a disease management approach / M. C. Enebe, O. O. Babalol et al. *Applied Microbiology and Biotechnology*. 2019. Vol. 103, № 1. P. 9–25. https://doi.org/10.1007/s00253-018-9433-3

16. Ge H. Growth-promoting ability of *Rhodopseudomonas palustris* G5 and its effect on induced resistance in cucumber against salt stress / H. Ge, F. Zhang. *Journal of Plant Growth Regulation.* 2019. Vol. 38, № 1. P. 180–188. https://doi.org/10.1007/s00344-018-9825-8

17. Hassan M. A. Cold stress in wheat: plant acclimation responses and management strategies / M. A. Hassan, C. Xiang, M. Farooq et al. *Frontiers in Plant Science*. 2021. Vol. 12. Art. № 676884. https://doi.org/10.3389%2Ffpls.2021.676884

18. Hnatush S. O. Influence of cobalt chloride and ferric citrate on purple non-sulfur bacteria *Rhodopseudomonas yavorovii* / S. O. Hnatush, O. D. Maslovska, S. Y. Komplikevych, I. V. Kovbas et al. *Biosystems Diversity*. 2022. Vol. 30, № 1. P. 31–38.https://doi.org/10.15421/012204

19. Hussain H. A. Chilling and drought stresses in crop plants: implications, cross talk, and potential management opportunities / H. A. Hussain, S. Hussain, A. Khaliq et al. *Frontiers in Plant Science*. 2018. Vol. 9. Art. № 393. https://doi.org/10.3389%2Ffpls.2018.00393

20. Imran A. *Ochrobactrum* sp. Pv2Z2 exhibits multiple traits of plant growth promotion, biodegradation and N-acyl-homoserine-lactone quorum sensing / A. Imran, M. J. A. Saadalla, S. U. Khan, M. S. Mirza, K. A. Malik, F. Y. Hafeez. *Annals of Microbiology.* 2014. Vol. 64. P. 1797–1806. https://doi.org/10.1007/s13213-014-0824-0

21. Jaishankar M., Tseten T., Anbalagan N., Mathew B. B., Beeregowda K. N. Toxicity, mechanism and health effects of some heavy metals. *Interdisciplinary Toxicology*. 2014. Vol. 7, No. 2. P. 60–72. https://doi.org/10.2478/intox-2014-0009

22. Kabata-Pendias A. Trace elements in soils and plants. 4th ed. Boca Raton : CRC Press, 2011. 548 p. https://doi.org/10.1201/b10158

23. Kalaji H. M. Chlorophyll a fluorescence as a tool to monitor physiological status of plants under abiotic stress conditions / H. M. Kalaji, A. Jajoo, A. Oukarroum et al. *Acta Physiologiae Plantarum.* 2016. Vol. 38. P. 1–11. https://doi.org/10.1007/s11738-016-2113-y

24. Khan M. Y. Potential of plant growth promoting bacterial consortium for improving the growth and yield of wheat under saline conditions / M. Y. Khan, S. M. Nadeem, M. Sohaib et al. *Frontiers in Microbiology.* 2022. Vol. 13. Art. № 958522. https://doi.org/10.3389/fmicb.2022.958522

25. Khan S. T. Consortia-based microbial inoculants for sustaining agricultural activities. *Applied Soil Ecology.* 2022. Vol. 176. Art. № 104503. https://doi.org/10.1016/j.apsoil.2022.104503

26. Komplikevych S. Adaptation of *Ochrobactrum rhizosphaerae* IMV B-7956 bacteria to the effect of copper (II) chloride / S. Komplikevych, O. Maslovska, T. Moravska et al. *Mikrobiolohichnyi Zhurnal.* 2024. Vol. 86, № 3. P. 58–69. https://doi.org/10.15407/microbiolj86.03.058

27. Komplikevych S. Adaptations of the antarctic bacterium *Paenibacillus tundrae* IMV B-7915 to copper (II) chloride exposure / S. Komplikevych, O. Maslovska, T. Moravska et al. *Ukrainian Antarctic Journal.* 2023. № 2 (21). P. 66–78. https://doi.org/10.33275/1727-7485.1.2023.707

28. Komplikevych S. Changes in the pigment composition of *Rhodopseudomonas yavorovii* IMV B-7620 under the influence of heavy metal salts / S. Komplikevych, O. Maslovska, A. Halushka, S. Hnatush. *Мікробіологія і біотехнологія.* 2024. № 1. С. 6–21. https://doi.org/10.18524/2307-4663.2024.1 (60).297340

29. Komplikevych S. Culturable microorganisms of substrates of terrestrial plant communities of the Maritime Antarctic (Galindez Island, Booth Island) / S. Komplikevych, O. Maslovska, T. Peretyatko et al. *Polar Biology*. 2023. Vol. 46. P. 1–19. https://doi.org/10.1007/s00300-022-03103-7

30. Kour D. Microbial biofertilizers: Bioresources and eco-friendly technologies for agricultural and environmental sustainability / D. Kour, K. L. Rana, A. N. Yadav et al. *Biocatalysis and Agricultural Biotechnology.* 2020. Vol. 23. Art. № 101487. https://doi.org/10.1016/j.bcab.2019.101487

31. Kyrychenko O. V. Market analysis and microbial biopreparations creation for crop production in Ukraine. *Biotechnologia Acta*. 2015. Vol. 8, № 4. P. 40–52. https://doi.org/10.15407/biotech8.04.040

32. Maciel-Rodríguez M. The role of plant growth-promoting bacteria in soil restoration: A strategy to promote agricultural sustainability / M. Maciel-Rodríguez, F. D. Moreno-Valencia, M. Plascencia-Espinos et al. *Microorganisms*. 2025. Vol. 13, № 8. Art. № 1799. https://doi.org/10.3390/microorganisms13081799

33. Malovanyy M. Optimal pre-treatment of moderately old landfill leachate at the pilot-scale treatment plant using the combined aerobic biochemical and reagent method / M. Malovanyy, V. Zhuk, I. Tymchuk et al. *Heliyon*. 2023. Vol. 9, № 6. Art. № e16695. https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2023.e16695

34. Mourouzidou S. Introducing the power of plant growth promoting microorganisms in soilless systems: A promising alternative for sustainable agriculture / S. Mourouzidou, G. K. Ntinas, A. Tsaballa, N. Monokrousos. *Sustainability*. 2023. Vol. 15, № 7. Art. № 5959. https://doi.org/10.3390/su15075959

35. Naeem M. K. Physiological responses of wheat (Triticum aestivum L.) to drought stress / M. K. Naeem, M. Ahmad, M. Kamran et al. *International Journal of Plant & Soil Science.* 2015. Vol. 6, № 1. P. 1–9. https://doi.org/10.9734/IJPSS/2015/9587

36. Olanrewaju O. S. Bacterial consortium for improved maize (*Zea mays* L.) production / O. S. Olanrewaju, O. O. Babalol et al. *Microorganisms*. 2019. Vol. 7, № 11. Art. № 519. https://doi.org/10.3390/microorganisms7110519

37. Pandit B. Microbial biofertilizers: bioresources and eco-friendly technologies for agricultural and environmental sustainability. *Science and Culture.* 2024. Vol. 90, № 3–4. P. 92–100. https://doi.org/10.36094/sc.v89.2024.Microbial_Biofertilizers_Bioresources.Pandit.92

38. Parlak K. U. Effect of nickel on growth and biochemical characteristics of wheat (*Triticum aestivum* L.) seedlings. *NJAS-Wageningen Journal of Life Sciences.* 2016. Vol. 76. P. 1–5. https://doi.org/10.1016/j.njas.2012.07.001

39. Parnikoza I. Soils of the Argentine islands, Antarctica: diversity and characteristics / I. Parnikoza, E. Abakumov, S. Korsun et al. *Polarforschung*. 2017. Vol. 86, № 2. P. 83–96.

40. Pellegrini M. Plant growth-promoting bacterial consortia render biological control of plant pathogens: a review / M. Pellegrini, R. Djebaili, G. Pagnani et al. Sustainable Agrobiology: Design and Development of Microbial Consortia. 2024. P. 57–74. https://doi.org/10.1007/978-981-19-9570-5_4

41. Popovych V. Migration of hazardous components of municipal landfill leachates into the environment / V. Popovych, J. Telak, O. Telak et al. *Journal of Ecological Engineering.* 2020. Vol. 21, № 1. P. 52–62. https://doi.org/10.12911/22998993/113246

42. Saleh S. R. Wheat biological responses to stress caused by cadmium, nickel and lead / S. R. Saleh, M. M. Kandeel, D. Ghareeb et al. *Science of The Total Environment.* 2020. Vol. 706. Art. № 136013. https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2019.136013

43. Sharma A., Adhikari B., Shrestha M. [et al.]. Evaluation of heavy metals in vegetables from contaminated agricultural soils of Madhyapur Thimi, Bhaktapur District, Nepal and their potential health risk assessmen et al. *International Journal of Applied Sciences and Biotechnology.* 2022. Vol. 10, No. 3. P. 149–163. https://doi.org/10.3126/ijasbt.v10i3.48703

44. Su Y. *Rhodopseudomonas palustris* shapes bacterial community, reduces Cd bioavailability in Cd contaminated flooding paddy soil, and improves rice performance / Y. Su, Q. Shi, Z. Li et al. *Science of The Total Environment*. 2024. Vol. 926. Art. № 171824. https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2024.171824

45. Sundar L. S. Utilization of *Rhodopseudomonas palustris* in Crop Rotation Practice Boosts Rice Productivity and Soil Nutrient Dynamics / L. S. Sundar, K. S. Yen, Y. T. Chang, Y. Y. Chao. *Agriculture*. 2024. Vol. 14, № 5. Art. № 758. https://doi.org/10.3390/agriculture14050758

46. Talebi R. Evaluation of chlorophyll content and canopy temperature as indicators for drought tolerance in durum wheat (*Triticum durum* Desf.). Australian *Journal of Basic and Applied Sciences.* 2011. Vol. 5, № 11. P. 1457–1462.

47. Ukraine and the UK officially legally consolidated the abolition of import duties and tariff quotas in bilateral trade : [news] / Ministry of Economy of Ukraine. URL: https://me.gov.ua/News/Detail/29b4233b-e60e-4224-ae2e-81b5a7e62cdc?lang=en-GB (дата звернення: 30.12.2025).

48. Wang C. Mechanisms on salt tolerant of *Paenibacillus polymyxa* SC2 and its growth-promoting effects on maize seedlings under saline conditions /

C. Wang, J. Pei, H. Li et al. *Microbiological Research*. 2024. Vol. 282. Art. № 127639. https://doi.org/10.1016/j.micres.2024.127639

49. Wang J. Beneficial bacteria activate nutrients and promote wheat growth under conditions of reduced fertilizer application / J. Wang, R. Li, H. Zhang et al. *BMC Microbiology*. 2020. Vol. 20. P. 1–12. https://doi.org/10.1186%2Fs12866-020-1708-z

50. Wang Y. The long-term effects of using phosphate-solubilizing bacteria and photosynthetic bacteria as biofertilizers on peanut yield and soil bacteria community / Y. Wang, S. Peng, Q. Hua et al. *Frontiers in Microbiology*. 2021. Vol. 12. Art. № 693535. https://doi.org/10.3389/fmicb.2021.693535

51. Woo S. L. Microbial consortia: promising probiotics as plant biostimulants for sustainable agriculture / S. L. Woo, O. Pep et al. *Frontiers in Plant Science*. 2018. Vol. 9. Art. № 1801. https://doi.org/10.3389/fpls.2018.01801

52. Wuana R. A., Okieimen F. E. Heavy metals in contaminated soils: a review of sources, chemistry, risks and best available strategies for remediation. *ISRN Ecology.* 2011. Vol. 2011. Article ID 402647. 20 p. https://doi.org/10.5402/2011/402647

53. Yu X. An indoleacetic acid-producing *Ochrobactrum* sp. MGJ11 counteracts cadmium effect on soybean by promoting plant growth / X. Yu, Y. Li, Y. Cui et al. *Journal of Applied Microbiology*. 2017. Vol. 122, № 4. P. 987–996. https://doi.org/10.1111/jam.13379

54. Zakry F. A. A. Isolation and plant growth-promoting properties of rhizobacterial diazotrophs from pepper vine (Piper nigrum L.) / F. A. A. Zakry, M. S. Halimi, K. B. Abdul Rahim et al. *Malaysian Applied Biology Journal.* 2010. Vol. 39, № 2. P. 41–45.

55. Zhao D. Isolation and genome sequence of a novel phosphate-solubilizing rhizobacterium *Bacillus altitudinis* GQYP101 and its effects on rhizosphere microbial community structure and functional traits of corn seedling / D. Zhao, Y. Ding, Y. Cui et al. *Current Microbiology*. 2022. Vol. 79, № 9. Art. № 249. https://doi.org/10.1007/s00284-022-02944-z

56. Бондарева О. Б., Вінюков О. О., Коноваленко Л. І. Застосування мікробних препаратів і регуляторів росту рослин для зниження накопичення важких металів у зерні пшениці озимої. *Аграрні інновації*. 2021. № 5. С. 12–16. https://doi.org/10.32848/agrar.innov.2021.5.2

57. Волкогон К. І. Розвиток мікроорганізмів азотного циклу в ризосфері пшениці озимої під впливом мінеральних добрив та бактеріальних препаратів. *Агроекологічний журнал*. 2013. № 3. С. 95–102.

58. Гнатуш С. О. Свідоцтво про депонування штаму бактерій *Paenibacillus tundrae* 5А–101 у Депозитарії Інституту мікробіології і вірусології ім. Д. К. Заболотного НАН України з наданням реєстра-

ційного номеру *Paenibacillus tundrae* ІМВ В-7915 / С. О. Гнатуш, Т. Б. Перетятко, О. М. Мороз, О. Д. Масловська, С. Я. Комплікевич. 2020.

59. Ключенко В. В. Вплив мікробних препаратів на продуктівність та якість зерна пшениці озимої в агрокліматичних умовах Степового Криму. *Наукові праці. Екологія.* 2011. Т. 152, № 140. С. 33–36.

60. Мороз О. М. Сульфідогенна активність сульфатвідновних та сірковідновних бактерій за впливу сполук металів / О. М. Мороз, С. О. Гнатуш, О. В. Тарабас, Х. І. Богославець, Г. В. Яворська, Б. М. Борсукевич. *Biosystems Diversity.* 2018. Vol. 26, № 1. С. 3–10. https://doi.org/10.15421/011801

61. Насіння сільськогосподарських культур. Методи визначення якості : ДСТУ 4138-2002 [Чинний від 2003-01-01]. Київ : Держспоживстандарт України, 2003. 173 с. (Державний стандарт України).

62. Оновлена щотижнева інфографіка про збитки, завдані довкіллю внаслідок збройної агресії рф станом на 26.12.2025 : [новина] / *Державна екологічна інспекція України.* 2025. 29 груд. URL: https://www.dei.gov.ua/post/onovlena-shchotizhneva-infografika-pro-zbitki-zavdani-dovkillyu-26-12-2025 (дата звернення: 30.12.2025).

63. Свідоцтво про депонування штаму бактерій *Ochrobactrum rhizosphaerae* К-3 у Депозитарії Інституту мікробіології і вірусології ім. Д. К. Заболотного НАН України з наданням реєстраційного номеру *Ochrobactrum rhizosphaerae* ІМВ В-7956 / С. О. Гнатуш, О. М. Мороз, О. Д. Масловська, С. Я. Комплікевич. 2021.

64. Скаржинський В. Ф. Дія Поліміксобактерину на урожайність та якість зерна пшениці озимої в умовах Лісостепу України / В. Ф. Скаржинський, І. С. Брощак, Ю. Т. Федорчак, Л. М. Токмакова. *Сільськогосподарська мікробіологія*. 2011. № 14. С. 121–128.

65. Тарабас О. В. Свідоцтво про депонування штаму бактерій *Rhodopseudomonas yavorovii* Ya-2016 у Депозитарії Інституту мікробіології і вірусології ім. Д. К. Заболотного НАН України з наданням реєстраційного номеру *Rhodopseudomonas yavorovii* ІМВ В-7620 / О. В. Тарабас, С. О. Гнатуш, О. М. Мороз, Б. О. Осташ. 2017.

Information about the authors:
Hnatush Svitlana Oleksiivna,
Candidate of Biological Sciences, Professor,
Head of the Department of Microbiology,
Ivan Franko National University of Lviv
4, Hrushevskyi street, Lviv, 79005, Ukraine

Komplikevych Solomiia Yaroslavivna,
PhD in Biology,
Junior Researcher at the Department of Microbiology
Ivan Franko National University of Lviv
4, Hrushevskyi street, Lviv, 79005, Ukraine

Maslovska Olha Dmytrivna,
Candidate of Biological Sciences,
Associate Professor at the Department of Microbiology
Ivan Franko National University of Lviv
4, Hrushevskyi street, Lviv, 79005, Ukraine

CHAPTER 5

MONITORING AND ASSESSMENT OF ATMOSPHERIC AIR QUALITY: SOURCES OF POLLUTION AND IMPACT ON ECOSYSTEMS

Dunaievska O. F., Sokulskiy I. M., Hutyy B. V.
DOI https://doi.org/10.30525/978-9934-26-654-6-5

INTRODUCTION

The current stage of society's development is characterized by an increase in anthropogenic pressure on the natural environment, which raises the issue of its preservation and rational use[1, 2, 3]. Environmental challenges related to climate change, ecosystem degradation, and biodiversity loss are becoming global in nature and require comprehensive scientific understanding and effective management decisions at the national and international levels[4, 5, 6]. One of the fundamental rights of Ukrainian citizens is the state-guaranteed right to an ecological environment that is safe for life and health, which is enshrined in national legislation and is part of constitutional human rights[7].

[1] Anthropogenic modifications: impacts and conservation strategies / A. Belgrano, F. Cucchiella, D. Jiang, M. Rotilio. *Scientific reports.* 2023. Vol. 13, № 1. P. 12009. https://doi.org/10.1038/s41598-023-38940-x

[2] Analysis of anthropogenic impact on the environment, measures to reduce it, and waste management / N. A. Eremeeva, O. A. Savoskina, L. M. Poddymkina et al. *Frontiers in bioengineering and biotechnology.* 2023. Vol. 11. P. 1114422. https://doi.org/10.3389/fbioe.2023.1114422

[3] Foysal M. J., Neilan B. A., Timms V. The impact of anthropogenic activities on antimicrobial and heavy metal resistance in aquatic environments. *Applied and environmental microbiology.* 2025. Vol. 91, № 4. P. e0231724. https://doi.org/10.1128/aem.02317-24

[4] Wood Hansen O., van den Bergh J. Environmental problem shifting from climate change mitigation: A mapping review. *PNAS nexus.* 2023. Vol. 3, № 1. pgad448. https://doi.org/10.1093/pnasnexus/pgad448

[5] Climate change, biodiversity loss, and Indigenous Peoples' health and wellbeing: a systematic umbrella review protocol / L. J. Brubacher, T. T. Chen, S. Longboat et al. *Systematic reviews.* 2024. Vol. 13, № 1. P. 8. https://doi.org/10.1186/s13643-023-02423-x

[6] Interconnecting global threats: climate change, biodiversity loss, and infectious diseases. The Lancet / A. Pfenning-Butterworth, L. B. Buckley, J. M. Drake et al. *Planetary health.* 2024. Vol. 8, № 4. P. 270–283. https://doi.org/10.1016/S2542-5196 (24)00021-4

[7] Бузунко О. А. Функції держави із забезпечення судового захисту екологічних прав громадян. *Юридичний вісник.* 2021. № 1. С. 235–240. DOI https://doi.org/10.32837/yuv.v0i1.2104

Human interests, in particular the creation of safe living conditions, including the environmental component, are among Ukraine's key national interests[8, 9]. The National Security Strategy of Ukraine emphasizes that personal security is the foundation of state security as a whole, and environmental security is one of its defining components[10, 11, 12].

The state provides guarantees for the creation of a safe environment, including an ecological one, for the life and health of the population, which is defined as one of the basic principles of environmental protection[13, 14]. At the same time, the ecological environment is important not only for humans, but also for the existence and development of the animal world, as it represents a complex of natural conditions and factors that ensure the vital activity, reproduction, and evolutionary development of living organisms[15].

The functioning of natural systems is based on a combination of various components and processes that are closely interrelated[16, 17]. Within these systems, the environment for living organisms is formed, which determines the conditions of their life activity, adaptive capabilities, and the stability of ecological relationships. Thus, the ecological environment includes a set of physical, chemical, and biological factors, as well as a system

---

[8] Buzunko O., Krasnova Y. Features of Judicial Protection of Environmental Rights of Citizens in the European Court of Human Rights. *Law. Human. Environmen.* 2022. Vol. 13, № 2. P. 7–16. doi:10.31548/law2022.02.001

[9] Мельниченко О. А., Макарова В. І., Старусева В. В. Екологічна безпека: значення та взаємозв'язок з іншими складовими національної безпеки. *Національні інтереси України.* 2025. № 5 (10). С. 1164–1173. https://doi.org/10.52058/3041-1793-2025-5(10)-1164-1173

[10] Заржицький О. С. Актуальні проблеми правового забезпечення екологічної політики України (теоретичні аспекти) : монографія. Дніпропетровськ : Національний гірничий університет, 2012. 200 с.

[11] Ващишин М. Я. Екологічне право vs право довкілля. *Юридичний науковий електронний журнал.* 2024. № 6. С. 171–175. DOI https://doi.org/10.32782/2524-0374/2024-6/41

[12] Ващенко С., Носаченко В. Державна політика у сфері екологічної безпеки. *Публічне управління: концепції, парадигма, розвиток, удосконалення.* 2024. № 7. С. 14–21. https://doi.org/10.31470/2786-6246-2024-7-14-21

[13] Андрійко О. Ф., Кисіль Л. Є. Адміністративно-правове забезпечення реалізації прав і свобод громадян в Україні. *Часопис Київського університету права.* 2015. № 3. С. 107–110.

[14] Green infrastructure and relationship with urbanization – Importance and necessity of integrated governance / N. V. Miroshnyk, A. F. Lichanov, T. O. Grabovska et al. *Land Use Policy.* 2021 № 114. P. 105941. https://doi.org/10.1016/j.landusepol.2021.105941

[15] Кондратьєва К. А. Актуальні дослідження у галузі правового регулювання екологічної безпеки в сільському господарстві. *Юридична Україна.* 2011. № 7. С. 37–41.

[16] Krohs U., Zimmer M. Do ecosystems have functions?. *Ecology and evolution.* 2023. Vol. 13, № 9. P. e10458. https://doi.org/10.1002/ece3.10458

[17] Regulation in ecological systems: an overview / C. M. Pinto Leite, Í. N. de Carvalho, J. G. D. E. Coutinho, C. N. El-Hani. *History and philosophy of the life sciences.* 2025. Vol. 47, № 4. P. 58. https://doi.org/10.1007/s40656-025-00707-0

of interactions between various components of the biocenosis–animals, plants, and microorganisms that form integral ecosystems[18]. Disruption of these interrelationships due to anthropogenic impact, climate change, or degradation of natural resources leads to a decrease in the stability of ecosystems and negatively affects their functioning. The quality and stability of the ecological environment determines not only the survival of individual species, but also the preservation of biodiversity as the basis for ecological balance and sustainable development of natural systems[19, 20]. Thus, ensuring environmental security is a complex task of state policy that combines the interests of individuals, society, and the environment and is of strategic importance for the sustainable development of Ukraine.

The development of humanity is closely linked to the growth of industrial production, which is one of the key factors of economic progress, but at the same time is a source of increased anthropogenic pressure on the environment[2122]. Under conditions of industrialization and urbanization, the volume of pollutant emissions into the atmosphere tends to increase, leading to a deterioration in air quality. The main sources of atmospheric pollution remain industrial enterprises and motor transport[23, 24, 25], with industrial emissions accounting for almost twice as much as emissions from vehicles. The most intense volumes of pollutants enter the air as a result of the activities

[18] Effect of organic farming on insect diversity / T. Grabovska, V. Lavrov, O. Rozputnii et al. *Ukrainian Journal of Ecology.* 2020. Vol. 10, № 4. 96–101. doi 10.15421/2020_174

[19] Гетьман А. П. Верховенство права в інституті управління природокористуванням та охороною довкілля. *Екологічне право України. Науково-практичний журнал.* 2017. № 3-4. С. 2–7.

[20] Святченко Л. О., Корабльова А. А. Поняття та юридичні ознаки екологічної безпеки у тваринництві. *Право. Людина. Довкілля. К. : НУБіП України.* 2019. Том 10, № 1. С. 73–82. https://doi.org/10.31548/law2019.01.010

[21] Analysis of anthropogenic impact on the environment, measures to reduce it, and waste management / N. A. Eremeeva, O. A. Savoskina, L. M. Poddymkina et al. *Frontiers in bioengineering and biotechnology.* 2023. Vol. 1. P. 1114422. https://doi.org/10.3389/fbioe.2023.1114422

[22] Rhind S. M. Anthropogenic pollutants: a threat to ecosystem sustainability?. *Philosophical transactions of the Royal Society of London. Series B, Biological sciences.* 2009. Vol. 364, № 1534. P. 3391–3401. https://doi.org/10.1098/rstb.2009.0122

[23] Chandrappa R., Chandra Kulshrestha U. Major Issues of Air Pollution. *Sustainable Air Pollution Management: Theory and Practice.* 2015. P. 1–48. https://doi.org/10.1007/978-3-319-21596-9_1

[24] Anthropogenic modifications: impacts and conservation strategies / A. Belgrano, F. Cucchiella, D. Jiang, M. Rotilio. *Scientific reports.* 2023. Vol. 13, № 1. 12009. https://doi.org/10.1038/s41598-023-38940-x

[25] Effects of transport-carbon intensity, transportation, and economic complexity on environmental and health expenditures / Z. Hussain, B. Marcel, A. Majeed, R. S. M. Tsimisaraka. *Environment, development and sustainability,* 2023. P. 1–31. Advance online publication. https://doi.org/10.1007/s10668-023-03297-8

of thermal power plants that use fossil fuels and are characterized by high emissions of sulfur, nitrogen, carbon, and particulate matter.

A significant contribution to atmospheric pollution is made by metallurgical and coal industry enterprises, whose operations are accompanied by intensive emissions of toxic gaseous compounds, heavy metals, and dust fractions of varying dispersibility. Such pollutants can accumulate in the air, soil, and water bodies for a long time, leading to the deterioration of the natural environment and increased environmental risks for the population, in particular an increase in the incidence of respiratory and cardiovascular diseases[26], [27]. Given the preservation of traditional production processes, these industries remain among the most environmentally burdensome. In this regard, it is particularly important to introduce modern environmentally friendly and resource-saving technologies, gradually modernize production processes, improve the efficiency of gas cleaning facilities, and strengthen state and public control over compliance with industrial emission standards. The implementation of such measures is a necessary prerequisite for reducing the anthropogenic load on the atmosphere and ensuring the environmental safety of regions.

The state of atmospheric air and the natural environment as a whole is influenced by a complex of interrelated natural and anthropogenic factors, among which military emergencies occupy a special place[28, 29, 30]. Combat operations are accompanied by large-scale destruction of industrial, transport, and energy infrastructure, leading to a sharp increase in emissions of pollutants into the atmosphere, as well as secondary pollution of soil and water bodies[31].

According to available estimates, the environmental damage caused to Ukraine's environment, in monetary terms, amounted to approximately

---

[26] Belokon K. V. The investigation of the emissions influence from industrial enterprises on pollution of atmospheric air in the zavodskyi district of Zaporizhzhya. *Collection of scholarly papers of Dniprovsk State Technical University (Technical Sciences).* 2018. Vol. 2, № 33. P. 91–96. https://doi.org/10.31319/2519-2884.33.2018.206

[27] Osokina N. Modern problems of ukraine's ecology: agricultural pollutants and the quality of drinking water in the city of Kyiv. *Environmental safety and environmental management.* 2024. Vol. 3, № 51. P. 22–27. https://doi.org/10.32347/2411-4049.2024.3.22-27

[28] Leaning J. Environment and health: 5. Impact of war. *CMAJ : Canadian Medical Association journal = journal de l'Association medicale canadienne.* 2000. Vol. 163, № 9. P. 1157–1161.

[29] Ivanet M., Hordiienko A., Horielyshev S. Analysis of sources of military emergencies and their consequences. *Honor and law.* 2023. Vol. 1 (84). P. 36–43. DOI: https://doi.org/10.33405/2078-7480/2023/1/84/276810

[30] Environmental consequences of military operations in Ukraine on the example of soil research in the Kharkiv region / O. V. Krainiuk, Y. V. Buts, R. V. Ponomarenko et al. *Journal of Geology, Geography and Geoecology.* 2025. Vol. 34, № 2. P. 304–317. https://doi.org/10.15421/112526

[31] Безсонов Є. Вплив «шуму війни» на екосистеми України. *Екологічний вісник.* [Електронний ресурс]. 2022. № 3. С. 25–26.

UAH 2 trillion as of December 2023, which indicates an unprecedented scale of negative impact on natural systems[32]. Back in 2015, as a result of intensive pollution of water resources and atmospheric air in the Donetsk region, signs of a potential environmental disaster were recorded, the risks of which have significantly increased in the context of further military escalation[33].

Natural reserves are particularly affected, especially in the Luhansk and Donetsk regions, where military operations are disrupting natural landscapes, destroying rare species of flora and fauna, and causing the loss of unique ecosystem functions[34]. In just a year and a half of active warfare, an extremely large number of animals and plants have been destroyed, leading to a significant reduction in biodiversity and disruption of food chains[35, 36, 37, 38].

The impact of the war in Ukraine extends beyond national borders and has global environmental consequences[39, 40, 41, 42]. Significant emissions of greenhouse gases and toxic substances into the atmosphere contribute to the

---

[32] Стрілець Р. Шкода довкіллю. (2024). URL: https://armyinform.com.ua/2023/04/15/shkoda-dovkillyu-vid-vijny-vzhe-perevyshhuye-19-tryljona-gryven-ruslan-strilecz/ (дата звернення: 14.01.2026).

[33] Війна і довкілля: заповідники в зоні АТО. Українська правда. URL: https://life.pravda.com.ua/society/2015/03/7/190398/ (дата звернення: 14.01.2026).

[34] Губарєва В. 500 днів війни: експерти обговорюють вплив війни на довкілля. URL: https://uwecworkgroup.info/uk/500-days-of-war-experts-discuss-the-wars-environmental-impacts/ (дата звернення: 14.01.2026).

[35] Омельчук О, Садогурська С. Природа та війна: як військове вторгнення Росії впливає на довкілля України. URL: https://ecoaction.org.ua/pryroda-ta-vijna.html (дата звернення: 15.01.2026)

[36] Pirgo O. International and domestic practices for the protection of animals from cruelty in the conditions of armed conflict. *Bulletin of Luhansk Scientific-Educational Institute named after E. O. Didorenko.* 2024. Vol. 3. P. 125–133. https://doi.org/10.32782/2786-9156.107.3.125-133

[37] Dukhnevych A. V., Karpinska N. V. Environmental consequences of war: assessment of waste impact on the environment. *Analytical and Comparative Jurisprudence.* 2025. No. 1. C. 347–352. https://doi.org/10.24144/2788-6018.2025.01.55

[38] Бондар О. І., Фінін Г. С., Шевченко Р. Ю. Екологічні виклики воєнного часу: оцінка впливу на довкілля космічними системами дистанційного зондування та GPS-навігації. *Екологічні науки.* 2022. № 4 (43). С. 40–49. DOI: https://doi.org/10.32846/2306-9716/2022.eco.4-43.7

[39] Лісова Н. О. Вплив військових дій в Україні на екологічний стан території. *Наукові записки Тернопільського національного педагогічного університету імені Володимира Гнатюка. Серія: географія.* 2017. № 43 (2). С. 165–173.

[40] Екологічна безпека в умовах воєнного стану / О. М. Семерня, О. І. Любинський, І. В. Федорчук та ін. *Економічні науки: науково-практичний журнал. 2022.* № 2 (41). С. 62–66. https://doi.org/10.32846/2306-9716/2022.eco.2-41.11

[41] Перспективи відшкодування екологічної шкоди, спричиненої збройною агресією РФ в рамках міжнародних екологічних угод: посібник / Є. Алексєєва, С. Баран, С. Гольфстрьом та ін. за наук. ред. О. Кравченко, Д. Скрильнікова. Львів : Видавництво «Компанія «Манускрипт»», 2023. 92 с.

[42] Іванюта С., Якушенко Л. Пріоритети забезпечення екологічної безпеки України в умовах російської воєнної агресії : аналітична доповідь. *НІСД.* 2024. 61. https://doi.org/10.53679/NISS-analytrep.2024.11

acceleration of climate change, while pollution of surface and groundwater, soil degradation, and biodiversity loss threaten the stability of ecosystems not only at the regional but also at the planetary level[43, 44].

The southern regions of Ukraine are particularly vulnerable, where steppe ecosystems, due to their natural sensitivity to wind erosion, are undergoing accelerated degradation as a result of the destruction of vegetation cover and disruption of soil structure[45]. In addition, the ecological balance in ornithological complexes is disrupted: intense noise and technogenic influences change bird behavior, causing the loss of traditional nesting sites and migration routes, which in turn leads to a decrease in population size and a reduction in the reproductive potential of species[46]. Thus, military actions are a powerful destructive factor that has a complex impact on the atmosphere, biodiversity, and functioning of ecosystems, highlighting the need for scientific monitoring, post-war ecological rehabilitation, and integration of the ecological component into the national security system.

Thus, the state of atmospheric air and the natural environment in Ukraine is shaped by a combination of industrial, transport, and military factors, the effects of which are long-term and often irreversible. Ensuring environmental safety should be considered an integral part of national security and sustainable development of the state in the context of modern challenges.

1. The condition of the air basin as an indicator of environmental quality

Ensuring environmental safety and preventing negative changes in the natural environment is one of the priorities of the state environmental policy. To this end, Ukraine has a State Environmental Monitoring System in place, which provides for comprehensive and systematic observation of the state of key natural components, assessment of environmental risks, and forecasting of possible changes under the influence of natural and anthropogenic factors (Polozhennia

[43] The human toll and humanitarian crisis of the Russia-Ukraine war: The first 162 days / U. Haque, A. Naeem, S. Wang et al. *BMJ Global Health.* 2022.Vol. 7, № 9. article number e009550. https://doi.org/10.1136/bmjgh-2022-009550.

[44] Екологічні проблеми сільського господарства в умовах воєнного стану / О. Ф. Дунаєвська, І. М. Сокульський, Н. В. Мельник, А. О. Піціль. *Екологічні науки.* 2024. № 1 (52). Том 1. С. 22–27. https://doi.org/10.32846/2306-9716/2024.eco.1-52.1.3

[45] Impact of the full-scale war in Ukraine on the environment: Environmental damage assessment / Yu., Polukarov, N., Kachynska, O., Polukarov et al. *Law. Human. Environment.* 2024. Vol. 15, № 1. P. 85–100. https://doi.org/10.31548/law/1.2024.85.

[46] Pipia S. The Effect of Russia's Invasion of Ukraine on Non-Human Animals: International Humanitarian Law Perspectives. *Israel Law Review.* 2024. Vol. 57, № 2. P. 265–287. https://doi.org/10.1017/S0021223724000086

pro derzhavnu systemu monitorynhu dovkillia : Postanova KMU № 391, 1998)[47]. Despite the existence of a regulatory framework and environmental control tools, atmospheric air remains one of the most vulnerable components of the environment. It is constantly polluted by stationary and mobile sources, accompanied by the release of a wide range of harmful impurities into the air. Some of these have a pronounced toxic and carcinogenic effect, posing a threat to public health and increasing the risk of premature mortality.

Particular attention is paid in global practice to assessing the impact of the most dangerous atmospheric pollutants. According to the recommendations of the World Health Organization, priority air quality indicators include ground-level ozone, particulate matter with an aerodynamic diameter of less than 2.5 μm, and nitrogen dioxide, which are characterized by a high risk of adverse effects on human health and require constant monitoring (nakaz Ministerstva okhorony zdorovia Ukrainy № 89 vid 17 sichnia 2022)[48].

A separate area of environmental assessment is the identification and classification of carcinogenic substances that can enter the atmosphere and pose a potential health risk to the population. The International Agency for Research on Cancer, in collaboration with the Ministry of Health of Ukraine, has compiled a list of such compounds and divided them into five groups depending on the degree of carcinogenic hazard (nakaz MOZ Ukrainy vid 20.06.2022 № 1054., 2024)[49]. The introduction of this classification makes it possible to assess the risks of pollutants more reasonably, identify priority areas for environmental control, and develop effective preventive measures.

In addition, in the context of growing man-made and military risks, the use of specialized methods for predicting the likely impact of toxic substances in the event of accidents or emergencies is of particular importance (nakaz Ministerstva vnutrishnikh sprav Ukrainy № 1000 vid 29.11.2019)[50].

---

[47] Положення про державну систему моніторингу довкілля : Постанова КМУ № 391, 1998. URL: https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/391-98-%D0%BF#Text (дата звернення: 15.01.2026).

[48] Оцінка ризику для здоров'я населення від забруднення атмосферного повітря: наказ Міністерства охорони здоров'я України № 89 від 17 січня 2022 р. URL: https://moz.gov.ua/uk/decrees/nakaz-moz-ukraini-vid-17012022--89-pro-zatverdzhennja-metodichnih--rekomendacij-ocinka-riziku-dlja--zdorovja-naselennja-vid-zabrudnennja-atmosfernogo-povitrja (дата звернення: 15.01.2026).

[49] Про затвердження Гігієнічного нормативу «Перелік речовин, продуктів, виробничих процесів, побутових та природних факторів, канцерогенних для людини» : наказ МОЗ України від 20.06.2022 № 1054. URL: https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/z0910-22#Text. (дата звернення: 15.01.2026).

[50] Про затвердження Методики прогнозування наслідків виливу (викиду) небезпечних хімічних речовин під час аварій на хімічно небезпечних об'єктах і транспорті: наказ Міністерства внутрішніх справ України № 1000 від 29.11.2019 р. URL: https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/z0440-20#Text. (дата звернення: 15.01.2026).

Such approaches allow for timely assessment of the scale of possible pollution, minimization of negative environmental impacts, and ensuring an adequate level of protection for the population. In this context, the state of atmospheric air is of particular importance as an integral indicator of the ecological quality of the environment, reflecting the cumulative impact of natural and anthropogenic factors and the level of technogenic load on the territory.

The current state of the environment is determined by the interaction of natural and anthropogenic factors, among which the state of atmospheric air is of particular importance. Air quality directly affects the health of the population, the functioning of ecosystems, and the stability of natural processes, therefore its systematic study is an important task of environmental science and natural resource management.

Research on the selected topic was conducted during 2023–2024 to assess the ecological state of the region's air basin and identify the main factors of its pollution. The object of the study is the ecological state of the air basin of the Zhytomyr region, while the subject is air quality indicators, sources of pollution, and their dynamics during the study period.

Various scientific methods were used to achieve the set goal. Among them are:

– analytical and generalisation – review of literary sources, processing of previous research results, formulation of conclusions;

– descriptive – systematisation and analysis of atmospheric air measurement results;

– comparative – comparison of the data obtained with the results of previous studies to identify trends and changes;

– cartographic – depiction of the spatial distribution of pollutants on a map of the region;

– statistical and graphical – processing of numerical data, construction of diagrams, graphs, and tables for visual presentation of results.

For direct research into the state of atmospheric air, air samples were taken using specialized instruments and impurities were determined in accordance with methodological recommendations and standards[51, 52]. This comprehensive approach allows for a scientifically sound assessment of the state of the air basin and identification of key factors affecting its quality.

Emissions of pollutants into the atmosphere are mixtures or individual components that negatively affect air quality and the environment. Such substances are produced in certain facilities called emission sources and may

[51] Методи вимірювання параметрів навколишнього середовища: підручник / Г. І. Гринь, В. І. Мохонько, О. В. Суворін та ін. Сєвєродонецьк : Видавництво СНУ ім. В. Даля, 2019. 420 с.

[52] 52. ДСТУ ISO 4219:2004. Якість повітря. Визначання газоподібних сірчистих сполук у навколишньому повітрі. Устаткування для відбирання проб (ISO 4219:1979, IDT).

be of chemical or biological origin. Pollutant emissions directly affect human health, ecosystems, and natural processes, so their regulation is an important element of state environmental policy.

In Ukraine, the list of pollutants and emission standards are approved by legislative and regulatory documents. In particular, these are Resolution of the Cabinet of Ministers of Ukraine No. 1598 of November 29, 2001, "List of the most common and dangerous pollutants, whose emissions into the atmosphere are subject to regulation" and Order of the Ministry of Ecology and Natural Resources No. 177 of May 10, 2002, "Instructions on the procedure and criteria for state registration of objects that have or may have a harmful effect on human health and the state of the atmosphere". These documents establish which sources are subject to control and define the procedures for recording harmful emissions.

Emission standards are set for each pollutant, which allows for the assessment of the environmental impact of industrial and other enterprises. If the established standards are exceeded, the excess emissions are calculated and the amount of compensation for the damage caused is determined in accordance with the "Methodology for calculating the amount of compensation for damage caused to the state as a result of excess emissions of pollutants into the atmosphere", approved by Order of the Ministry of Energy and Environmental Protection of Ukraine No. 277 of April 28, 2020. This approach not only allows for the assessment of economic damage, but also encourages enterprises to reduce emissions.

Separate procedures are provided for emergencies or martial law. For such cases, a methodology has been approved for determining unorganized emissions of pollutants into the air and calculating the amount of damage caused, in accordance with Order No. 175 of the Ministry of Environmental Protection and Natural Resources of Ukraine dated April 13, 2022. This allows for the rapid assessment of environmental damage in cases of emergencies and the planning of measures to minimize negative consequences.

An important indicator of atmospheric air quality is the calculation of pollutant emissions per person per year. This indicator is determined for stationary sources of pollution and used to assess long-term trends. An analysis of the dynamics shows that, compared to 2010, per capita emissions have almost halved, which is explained by the modernization of industrial enterprises, a reduction in production, and the introduction of modern purification technologies (Fig. 1). However, despite the positive trends, the problem of air pollution remains relevant and requires constant monitoring, the introduction of new environmental standards, and active state and public monitoring.

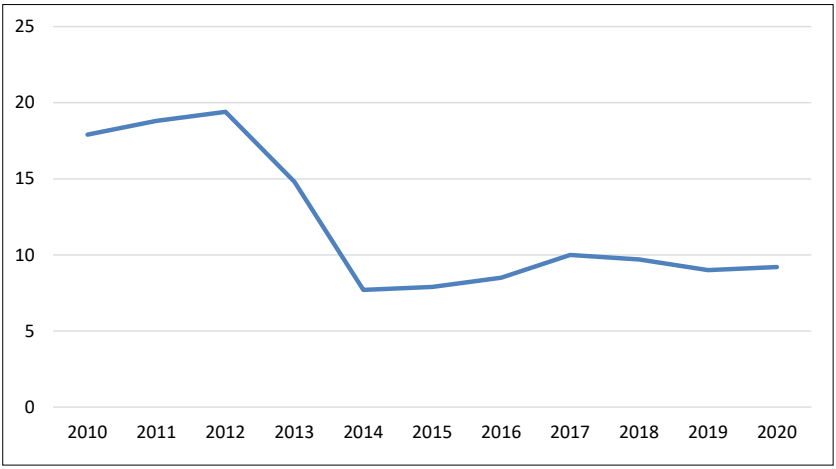


Fig. 1. Trends in emissions from stationary sources for the period 2010–2020 (kg/person)

In addition, it should be noted that modern approaches to emissions management include not only control over the amount of harmful substances, but also assessment of their impact on public health and ecosystems, forecasting possible consequences, and developing preventive measures. Including such measures in strategic environmental policy planning makes it possible to more effectively reduce anthropogenic pressure on the atmosphere and improve the quality of the environment at the regional and national levels.

Zhytomyr Oblast is an administrative-territorial unit comprising four districts and 66 territorial communities, among which the city of regional significance, Zhytomyr, is of particular importance. The region is located within two soil and climatic zones – Polissya and forest-steppe – which determines the diversity of natural conditions and influences the formation of the local climate. Typical meteorological phenomena are observed in the region's atmosphere, including fog, wind, thunderstorms, and precipitation. In recent years, there has been an increase in the frequency and intensity of dangerous meteorological phenomena, including heavy rain and snowfall, strong winds, and squalls, which have a potentially negative impact on the natural environment and the socio-economic sphere.

Atmospheric air is a unique natural resource on which the life of all organisms on Earth depends. Ensuring its purity and sustainable condition is a pressing task for modern society and one of the priorities of the

state's environmental policy. Industrial development, intensive use of natural resources, and urbanization create an additional burden on the environment, which manifests itself, in particular, in an increase in the volume of pollutant emissions into the atmosphere and changes in the chemical composition of the air basin.

Monitoring the state of atmospheric air is an integral part of the environmental monitoring system, as it allows assessing the level of pollution and its impact on public health, ecosystems, and biodiversity[53]. Despite this, in some cases, state air monitoring does not provide sufficient efficiency and completeness of data for comprehensive environmental management, planning of preventive measures, and response to emergencies. Harmful impurities are constantly entering the atmosphere along with emissions from industrial, transport, and domestic sources[54, 55, 56].

The main components of atmospheric air are nitrogen and oxygen, the latter accounting for approximately 21 percent by volume. In addition, air contains other gases, including argon, carbon dioxide, hydrogen, and water vapor, as well as various impurities[57, 58, 59]. Impurities are variable components and depend on geographical location, type of human activity, seasonal and meteorological conditions. These include, in particular, ammonia, ozone,

[53] Федонюк М. А. До питання удосконалення системи державного екологічного моніторингу стану атмосферного повітря. *Електронний журнал «Державне управління: удосконалення та розвиток».* 2013. № 2. http://www.dy.nayka.com.ua/?op=1&z=541

[54] Оцінка екологічного впливу нафтопереробного підприємства на навколишнє середовище України / С. В. Бойченко, О. Г. Пузік, П. І. Топільницький та ін. *Енергетика: економіка, технології, екологія.* 2016. № 4. С. 109–122.

[55] Петринич В. В., Л. І. Власик Петринич О. А. Свинець: токсикологічні, гігієнічні та біологічні аспекти. *Клінічна та експериментальна патологія.* 2017. Vol. 16, № 2. С. 97–102. https://doi.10.24061/1727-4338.XVI.2.60.2017.20

[56] Improvement of the current system for atmospheric air quality monitoring in Kyiv according to the EU requirements / I. V. Dvoretska, M. V. Savenets, L. M. Nadtochii et al. *Hydrology, Hydrochemistry and Hydroecology.* 2022. Vol. 3, № 65. P. 105–106. DOI: doi.org/10.17721/2306-5680.2022.3.8

[57] Jones R. L., Ball S. M., Shallcross D. E. Small scale structure in the atmosphere: implications for chemical composition and observational methods. *Faraday discussions.* 2005. Vol. 130. P. 165–524. https://doi.org/10.1039/b502633b

[58] McNeill V. F. Atmospheric Aerosols: Clouds, Chemistry, and Climate. *Annual review of chemical and biomolecular engineering.* 2017. Vol. 8. P. 427–444. https://doi.org/10.1146/annurev-chembioeng-060816-101538

[59] Schlesinger W. H., Bernhardt E. S. The Atmosphere. *Biogeochemistry.* 2020. P. 51–97. https://doi.org/10.1016/B978-0-12-814608-8.00003-7

sulfur oxides, methane, and other harmful substances[60, 61, 62, 63]. It is these impurities that have the most significant impact on air quality and the ecological state of the region.

Air is an integral part of the natural environment and an important resource for human life and ecosystem development[64, 65]. Its physical and chemical properties determine climatic conditions, environmental quality, and the functioning of natural processes, so assessing the state of atmospheric air and its components is a pressing task for environmental science.

The atmosphere is a complex gaseous envelope of the Earth, which forms a constant and stable complex of gases with a certain ratio of components, providing protection for the planet from cosmic radiation, maintaining temperature conditions, and enabling the existence of life[66, 67]. The main gases in the atmosphere include nitrogen, oxygen, argon, carbon dioxide, water vapor, and other impurities that constantly circulate and interact with each other, affecting meteorological phenomena and the ecological state of regions.

Sanitary norms and standards are applied to preserve air quality and prevent pollution. Air quality is constantly monitored at the global level, which allows assessing its safety for human health and the environment. For example, in European countries, an air quality index is calculated every hour,

---

[60] Direct measurements of the convective recycling of the upper troposphere / P. O. Wennberg, E. Scheuer, J. Dibb et al. *Science (New York, N. Y.).* 2007. Vol. 315, № 5813. P. 816–820. https://doi.org/10.1126/science.1134548

[61] Changes in air quality and tropospheric composition due to depletion of stratospheric ozone and interactions with climate / X. Tang, S. R. Wilson, K. R. Solomon et al. *Photochemical & photobiological sciences : Official journal of the European Photochemistry Association and the European Society for Photobiolog.* 2011. Vol. 10, № 2. P. 280–291. https://doi.org/10.1039/c0pp90039g

[62] Active atmosphere-ecosystem exchange of the vast majority of detected volatile organic compounds / J. H. Park, A. H. Goldstein, J. Timkovsky et al. *Science (New York, N. Y.).* 2013. Vol. 341 (6146). P. 643–647. https://doi.org/10.1126/science.1235053

[63] Volatile chemical products emerging as largest petrochemical source of urban organic emissions / B. C. McDonald, J. A. de Gouw, J. B. Gilman et al. *Science (New York, N.Y.),* Vol. 359 (6377). P. 760–764. https://doi.org/10.1126/science.aaq0524

[64] Updates in Air Pollution: Current Research and Future Challenges / D. Vilcins, R. C. Christofferson, J. H. Yoon et al. *Annals of global healt.* 2024. Vol. 90, № 1. P. 9. https://doi.org/10.5334/aogh.4363

[65] Environmental and Health Impacts of Air Pollution: A Review / I. Manisalidis, E. Stavropoulou, A. Stavropoulos, E. Bezirtzoglou. *Frontiers in public health.* 2020. Vol. 8. P. 14. https://doi.org/10.3389/fpubh.2020.00014

[66] Zahnle K., Schaefer L., Fegley B. Earth's earliest atmospheres. *Cold Spring Harbor perspectives in biology.* 2010. Vol. 2, № 10. a004895. https://doi.org/10.1101/cshperspect.a004895

[67] Experimental and simulation study of inert gas mixture inhibiting coal spontaneous combustion / X. Wang, L.Wang, W. Li, D. Liu. *Scientific Reports.* 2024. Vol. 14, 4305. https://doi.org/10.1038/s41598-024-53979-0

allowing for a rapid response to exceedances of permissible concentrations of harmful substances[68, 69, 70]. According to international studies, less than 1 % of the world's population has access to clean, breathable air.

Effective management of atmospheric air quality requires the implementation of comprehensive measures. These include the development and implementation of programs to reduce pollution levels, compliance with environmental standards, assessment of the impact of new substances and compounds for which maximum permissible concentrations (MPC) have not yet been determined, as well as updating and improving national environmental standards. Equally important are international cooperation, consultation, protection of citizens' rights, and consideration of environmental aspects in land-use planning, enterprise modernization, and the implementation of preventive measures[71, 72].

All facilities that could potentially cause harmful emissions into the atmosphere and negatively affect public health are subject to state registration in accordance with the "Instructions on the procedure and criteria for state registration of facilities that have or may have a harmful effect on human health and atmospheric air quality" (Order of the Ministry of Ecology and Natural Resources of Ukraine No. 177 of May 10, 2002). Such registration ensures systematic control, the ability to assess risks to the environment and people, and the formation of scientifically based recommendations for regulating emissions and improving air quality.

Air quality is one of the key indicators of the ecological state of the natural environment and the level of safety of human life[73, 74]. Air pollution

---

[68] Specific approach for continuous air quality monitoring / P. Zivkovic, M. A. Tomic, G. S. Ilic et al. *Hemijska industrija.* 2012. Vol. 66, № 1. P. 85–93. https://doi.org/10.2298/HEMIND110525066Z

[69] Long-term, continuous air quality monitoring in a cross-sectional study of three UK non-domestic buildings / S., Stamp, E., Burman, C., Shrubsole et al. . *Building and Environment.* 2020. Vol. 180, № 24. 107071 doi.org/10.1016/j.buildenv.2020.107071

[70] Air quality monitoring using statistical learning models for sustainable environment / M. Imam, S. Adam, S. Dev, N. Nesa. *Intelligent Systems with Applications.* 2024. Vol. 22. 200333 https://doi.org/10.1016/j.iswa.2024.200333

[71] Кожура Л. О. Адміністративно-правовий захист та охорона: поняття та співвідношення. *Науковий вісник Ужгородського національного університету. Серія «Право».* 2015. Вип. 35. Ч. І. Т. 2. С. 119–122.

[72] Рубцова І. Поняття й особливості детермінанти «Охорона атмосферного повітря». *Екологічне право.* 2021. № 6. С. 107–110. https://doi.org/10.32849/2663-5313/2021.6.17

[73] Revised analyses of the National Morbidity, Mortality, and Air Pollution Study: mortality among residents of 90 cities / F. Dominici, A. McDermott, M. Daniels et al. *Journal of toxicology and environmental health. Part A.* 2005. Vol. 68 (13-14). P. 1071–1092. https://doi.org/10.1080/15287390590935932

[74] Air Pollution and Health: The Need for a Medical Reading of Environmental Monitoring Data / M., Iriti, P., Piscitelli, E., Missoni, A. Miani. *International journal of environmental research and public health.* 2020. Vol. 17, № 7. 2174. https://doi.org/10.3390/ijerph17072174

is both local and transboundary in nature, causing negative impacts on human health, the functioning of natural and anthropogenically transformed ecosystems, and the course of climatic processes. Prolonged exposure to elevated concentrations of pollutants is associated with an increased risk of respiratory, cardiovascular, and other chronic diseases, as well as a decrease in the resistance of biological systems to external stressors. In this regard, systematic monitoring of atmospheric air quality, identification and assessment of pollution sources, analysis of the spatial and temporal dynamics of emissions, and implementation of effective environmental monitoring systems are of particular importance. The data obtained through such monitoring provides a scientific basis for making management decisions in the field of environmental protection, developing preventive measures to reduce anthropogenic pressure, and forming environmentally oriented policies for sustainable development of territories.

Ukraine has approved a list of the most common and potentially dangerous pollutants, the emissions of which into the atmosphere are subject to state regulation. This is provided for by Resolution of the Cabinet of Ministers of Ukraine No. 1598 of November 29, 2001, "On Approval of the List of the Most Common and Dangerous Pollutants, the Emissions of Which into the Atmosphere are Subject to Regulation". This list includes both common pollutants – nitrogen oxides, carbon monoxide, lead and its compounds, formaldehyde, as well as more dangerous substances, including metals, chlorine, fluorine, cyanides, freons, and other chemical compounds that can have a significant negative impact on the atmosphere and human health.

At the regional level, a list of enterprises whose activities are classified as environmentally hazardous due to emissions into the atmosphere has also been approved. Among them, the following stand out in the Zhytomyr region: KP "Zhytomyrteplokomunenergo" ZhMR, LLC "Cersanit Invest," LLC "OBIO," PJSC "Korosten MDF Plant," LLC "Monsarto Seeds." Such accounting allows for the control of pollution sources and the implementation of measures to minimize the negative impact on the environment and public health.

It is possible to assess the state of atmospheric air in the city of Zhytomyr using online monitoring services (Fig. 2), which provide general information about air quality in real time.

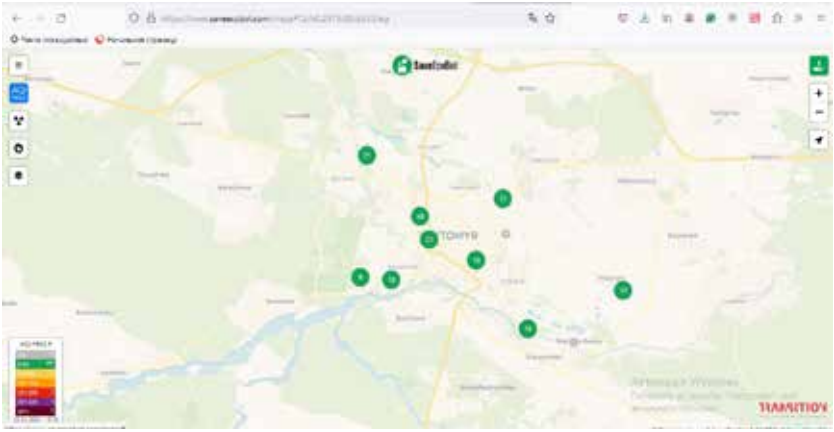


Fig. 2. Overall assessment of atmospheric air quality in real time online[75]

Individual indicators, such as concentrations of major pollutants, air temperature, humidity, atmospheric pressure, and wind speed, are available on specialized meteorological portals (Fig. 3). However, it should be noted that such information is for reference only: it does not always reflect the dynamics of pollution changes and does not contain data on potential hazards to humans and the environment.

The Earth's atmosphere is a gaseous envelope of the planet that was formed as a result of complex exogenous and endogenous processes. The main gases are nitrogen and oxygen, with nitrogen being considered inert and its concentration relatively stable, although it may increase slightly due to natural phenomena, such as volcanic emissions. In addition, the atmosphere contains argon, carbon dioxide, water vapor, and other impurities that affect meteorological processes and the chemical balance of the air.

Constant monitoring of air pollutant levels and compliance with established standards are necessary to preserve ecological balance and public health. This requires not only state registration of enterprises that produce emissions, but also the development and implementation of modern methods for monitoring, assessing, and forecasting the ecological state of the atmosphere.

[75] Якість повітря у місті Житомир. URL: https://www.saveecobot.com/maps/zhytomyr (дата звернення: 15.01.2025).

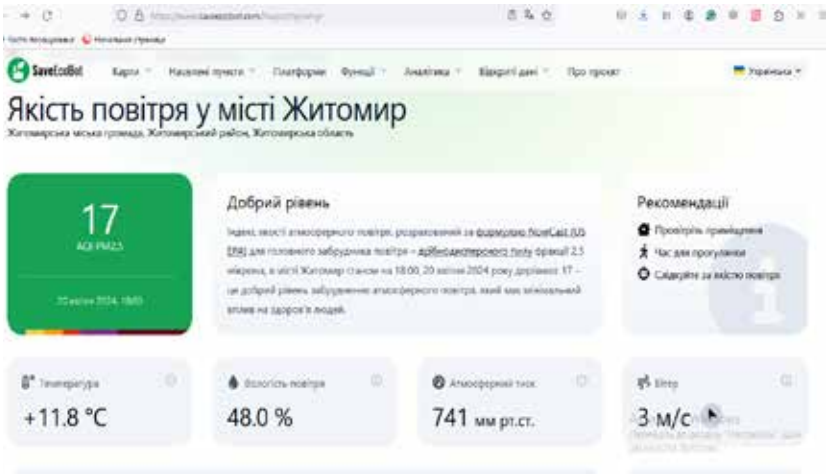


Fig. 3. General indicators of atmospheric air quality in real time online

Given the current challenges, in particular the intensification of industrial activity and the impact of climate change, a systematic approach to atmospheric air management is important, including: modernization of emission sources, optimization of pollution standards, development of air purification technologies, and international cooperation in the field of ecology. This approach provides a comprehensive assessment of the state of the atmospheric basin and effective measures to prevent negative impacts on the environment and human health.

2. Sources of atmospheric pollution and their environmental consequences

In modern conditions of increasing anthropogenic pressure on the environment, it is becoming increasingly important to study the factors that pose environmental risks to natural systems and public health. Particular attention should be paid to analyzing sources of pollution, the nature of their impact, and the consequences of harmful substances entering natural components, which allows for the justification of environmental control and management decisions. Thus, in addition to constant gas components, atmospheric air contains a variable part represented by various impurities, the concentration and composition of which depend on the intensity of natural and anthropogenic processes. These impurities enter the atmosphere as a result of stationary and mobile sources of pollution, which shape local and regional air quality characteristics.

Among the substances that enter the atmospheric air, compounds with proven carcinogenic effects on humans pose a significant danger. According to the order of the Ministry of Health of Ukraine dated 20.06.2022 No. 1054, humans людини (nakaz MOZ Ukrainy vid 20.06.2022 № 1054), some of these pollutants belong to the first group of carcinogens. This group includes asbestos, arsenic and its compounds, aflatoxins, benz(a)pyrene, beryllium and its compounds, chloromethyl methyl ether, diesel engine gases, mustard gas, coal tar and pitch, N-nitrosonornicotine, silicon oxide, nickel and its compounds, toluidine, hexavalent chromium compounds, and 2,3,4,7,8-pentachlorodibenzo-furan. A significant proportion of these substances enter the human body through inhalation, which increases the risk of developing chronic and oncological diseases.

Air pollution causes ecological imbalance and intensifies negative anthropogenic processes, which manifests itself, in particular, in the transformation of the vegetation cover of natural and urbanized areas. Plant communities are among the first components of ecosystems to respond to changes in the quality of atmospheric air, as they are in direct contact with pollutants throughout the growing season.

The action of pollutants causes physiological disorders in plants, in particular changes in the intensity of photosynthesis, gas exchange processes, transpiration, and mineral nutrition, which leads to a decrease in the productivity and viability of plant organisms. Under conditions of prolonged and systematic exposure to pollutants, they accumulate in plant tissues, causing anatomical and morphological changes in vegetative organs, in particular leaves and shoots. Such changes can manifest themselves in the disruption of the leaf blade structure, changes in cuticle thickness, degradation of conductive tissues, asymmetry of organs, and inhibition of growth processes. The combination of these reactions reflects the level of anthropogenic pressure on ecosystems and confirms the feasibility of using plants as sensitive indicators of atmospheric air quality in environmental monitoring systems.

In this regard, plants are widely used as sensitive bioindicators in biotic monitoring systems, in particular phytomonitoring, which allows assessing the level and spatial differentiation of atmospheric air pollution. Bioindication indicators reflect the cumulative impact of a complex of pollutants and are informative for long-term environmental observations. It has been established that air pollutants cause disturbances in the indicators of fluctuating asymmetry of the leaf blade of Betula pendula Roth, which is considered a sensitive indicator of environmental stress and destabilization of

plant growth conditions[76, 77]. An increase in the level of asymmetry indicates a decrease in the adaptive capacity of plant organisms and can be used for a comprehensive assessment of the ecological status of territories.

The negative impact of atmospheric pollutants has also been confirmed by numerous experimental studies on animals. Air pollution accelerates the development of pathological processes, reduces the adaptive capacity of the organism, and decreases the chances of survival. Pollutants cause morphological changes in the vessels of vital organs at the tissue level and can also be factors in the onset and progression of autoimmune diseases, particularly rheumatic diseases. The results obtained are reasonably extrapolated to humans[78, 79].

The atmospheric basin of the Zhytomyr region is formed by a combination of basic gas components and additional impurities, which can be either permanent or temporary. In terms of their functional significance, these components are divided into those necessary for human life and those that are inert. Products of anthropogenic activity are impurities that have a negative impact on the human body and the environment. Some of them contribute to the destruction of the ozone layer, while others exacerbate the greenhouse effect and global climate change processes. Pollution of the atmospheric basin of the Zhytomyr region is caused by both natural and anthropogenic sources. Natural factors include wind erosion of soil, which causes soil particles, biological material, and residues of agrochemicals, including fertilizers and pesticides, to be lifted into the air and carried over long distances.

The leading anthropogenic source of atmospheric pollution in the region is motor transport. The composition of toxic components released into the atmosphere in 2021 is shown in the diagram (Fig. 4).

---

[76] Біоіндикаційна оцінка впливу техногенного навантаження від забруднення атмосферного повітря в умовах змін промислової інфраструктури регіону / В. В. Бойко, Л. Д. Пляцук, Л. Г. Філатов, І. О. Трунова. *Вісник КрНУ імені Михайла Остроградського.* 2012. № 73. С. 150–153.

[77] Khannanova O. R., Arkanova A. A. Bioindication assessment of the atmospheric air of poltava municipal park. *Biolohiia ta ekolohiia*. 2017. Vol. 3 (1–2). P. 69–75.

[78] Identification of an Association of TNFAIP3 Polymorphisms With Matrix Metalloproteinase Expression in Fibroblasts in an Integrative Study of Systemic Sclerosis-Associated Genetic and Environmental Factors / P. Wei, Y. Yang, X. Guo et al. *Arthritis & rheumatology (Hoboken, N. J.)*. 2016. Vol. 68, № 3. P. 749–760. https://doi.org/10.1002/art.39476

[79] Вплив ксенобіотиків у повітрі на перебіг ангіопатії у щурів з моделлю системного аутоімунного ревматичного захворювання / Є. Д. Єгудіна, Г. С. Такташов, В. Я. Мікуксте та ін. *Здобутки клінічної і експериментальної медицини.* 2017. № 1. С. 32–37. https://doi.org/10.11603/1811-2471.2017.v0.i1.7335

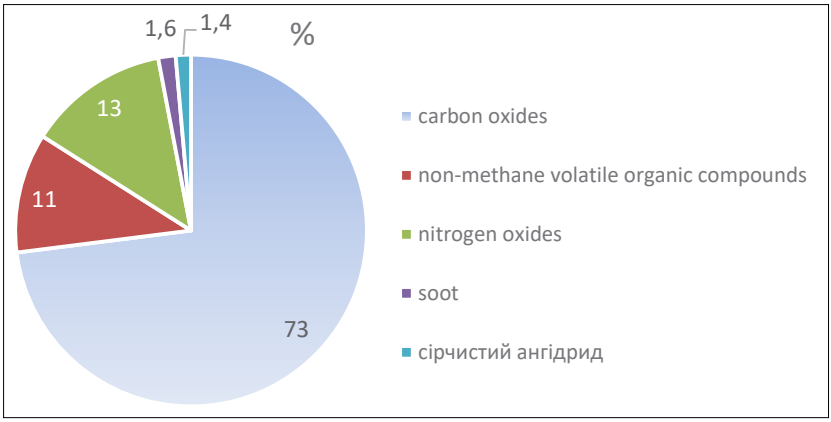


Fig. 4. Component composition of toxic substances released into the atmospheric air of the Zhytomyr region in 2021

These compounds have a negative impact on the ozone layer, the respiratory systems of humans and animals, and vegetation. In addition, they contribute to acid rain, climate change, and the deterioration of the overall ecological situation, which makes it difficult for ecosystems to adapt to increasing anthropogenic pressure. Elevated concentrations of carbon monoxide disrupt oxygen transport processes in the body, which is especially dangerous for people with chronic diseases of the cardiovascular and respiratory systems. Solid particles, in particular soot fractions, accumulate in the lungs and can cause inflammatory processes and the development of severe respiratory pathologies[80] [80].

Assessing changes in pollution indicators over time is an important tool for analyzing the effectiveness of environmental protection measures and identifying general patterns of the impact of socio-economic and external factors on the state of the environment. Analysis of statistical data makes it possible to track fluctuations in emissions and identify periods of increase or decrease. Analysis of the dynamics of pollutant emissions into the atmosphere shows that there is no consistent trend towards their constant reduction or increase. During the period under review, there were alternating phases of decline and increase in emissions, which was due to changes in the level of industrial activity, the intensity of transport flows, and the influence of economic and social factors. The total emissions from all sources of pollution are shown in Fig. 5.

[80] Patseva I., Kahukina A. Analysis of the atmospheric air state in the city of Zhytomyr. Sloboda. *Scientific Journal. Natural Sciences.* 2024. Vol. 1. 77–81. doi.org/10.32782/naturalspu/2024.1.10

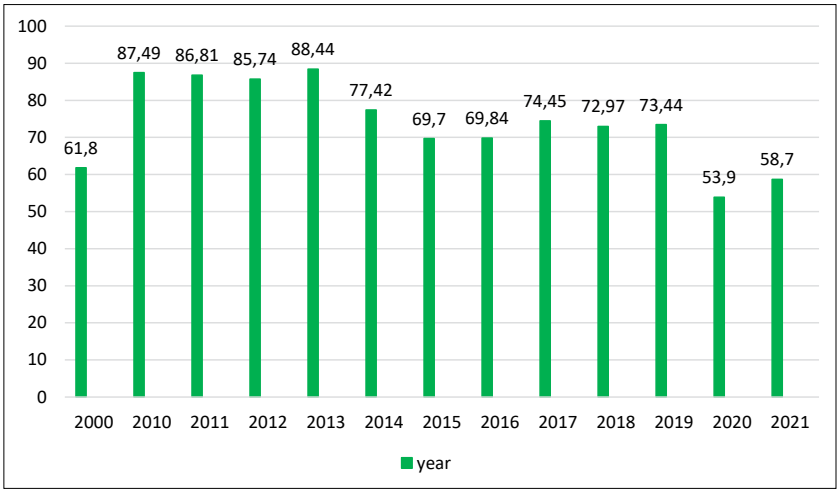


Fig. 5. Volumes of pollutant emissions into the atmosphere in Zhytomyr region in 2000–2020 (thousand tons)

At the same time, a comprehensive analysis of the current situation is complicated by the limited availability of official statistical information. Data on pollutant emissions in 2022–2023 were not published by the Main Statistical Office due to the introduction of martial law. This situation limits the possibility of a comprehensive assessment of the impact of military actions on the dynamics of anthropogenic load and requires the use of alternative sources of information and predictive approaches. The results obtained indicate the need to further improve the environmental monitoring system, in particular to ensure the continuity of data collection and publication even in emergency situations. This will increase the reliability of assessments of the environmental status of territories and enable the formulation of scientifically sound recommendations for reducing pollution levels.

An analysis of pollutant emission trends over the past 12 years shows significant variability in indicators over time. The lowest emissions were recorded in 2020, while the highest volumes were in 2013, reflecting periods of varying intensity of economic and transport activity (Fig. 5). In 2020–2021, there is a clear trend towards a decrease in total emissions: the reduction was 19.54 t and 14.74 t, respectively, which in relative terms corresponds to a decrease of 73.4 % and 79.9 %. The observed decrease in emissions during this period may be associated with a decline in industrial activity, restrictions on transport flows, and general socio-economic changes. At the same time,

it should be noted that the total indicator was formed by emissions from both stationary and mobile sources of pollution, whose contribution varies depending on the year of observation (Fig. 5).

An analysis of long-term trends in pollution sources shows that mobile sources continue to dominate in terms of total pollutant emissions. Over the past twenty years, their contribution has systematically exceeded emissions from stationary sources, as clearly shown in Figure 6 (with the exception of 2022–2023, for which no official statistics are available). On average, emissions from mobile sources were 3.5–4 times higher than those from stationary sources, indicating the decisive role of the transport sector in polluting the region's atmospheric basin. Stationary sources are characterized by significant variability in emissions over time. The minimum values were recorded in 2015, while the maximum values were recorded in 2011, with a difference of about 2.3 times between the extreme values. Such fluctuations may be related to changes in the structure of industrial production, the level of capacity utilization of enterprises, and the introduction or absence of environmental protection measures.

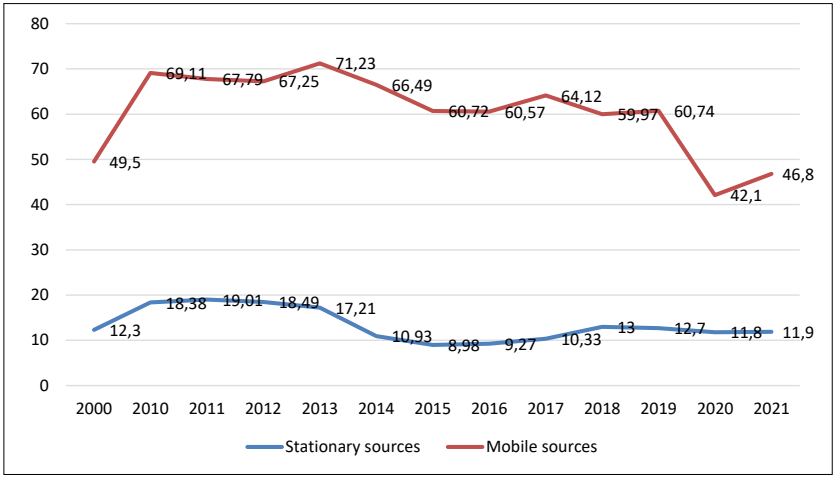


Fig. 6. Comparative dynamics of pollutant emissions into the atmospheric basin of Zhytomyr region (thousand tons)

The dynamics of emissions from mobile sources are more smoothed out, but also show clearly defined extreme values. The lowest emissions were recorded in 2020, which is probably due to a decrease in traffic intensity, while the highest values were recorded in 2013. The difference between the minimum and maximum values for this group of sources was about 1.7 times.

The results confirm that mobile sources are the main anthropogenic load on the atmospheric basin of the Zhytomyr region. This justifies the need to focus environmental protection measures on reducing transport emissions, in particular by optimizing transport infrastructure, renewing the vehicle fleet, and introducing environmentally friendly fuels.

For a comprehensive assessment of the spatial characteristics of anthropogenic load, it is advisable to use relative indicators that allow comparing emission volumes with the area of the territory. Such indicators make it possible to assess the intensity of pollution more objectively and identify periods with increased or decreased environmental load.

One of the important integral indicators characterizing the spatial distribution of pollutant emissions and their concentration levels over the region is the emission density, calculated per unit area (1 km²) and expressed in kilograms. This indicator makes it possible to assess the intensity of anthropogenic pressure on the atmosphere regardless of administrative boundaries and territory size, which is especially important for regions with a heterogeneous economic structure (Fig. 7).

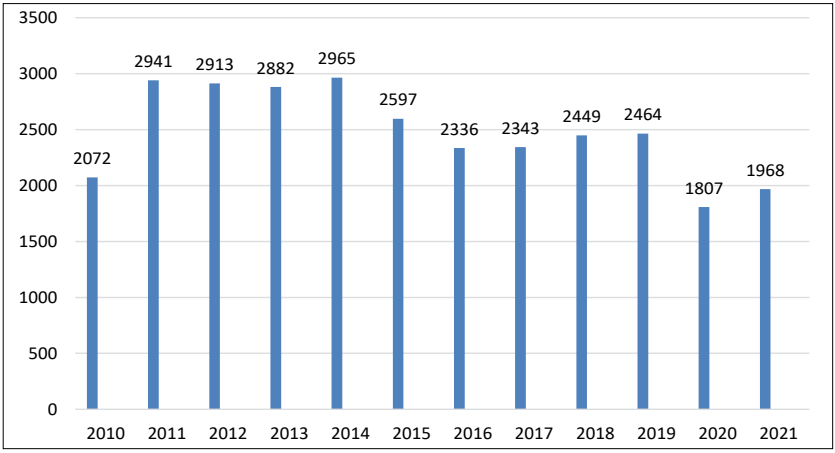


Fig. 7. Density of emissions distribution in the atmospheric basin of Zhytomyr region (kg per 1 km²)

Emissions density allows for a correct comparison of pollution levels at different times, as well as tracking trends in its growth or decline over time. In addition, this indicator is informative when analyzing the effectiveness of environmental protection measures and changes in the structure of pollution sources, in particular the ratio of stationary and mobile sources.

Data on the density of pollutant emissions within the Zhytomyr region are presented in Diagram 7, which clearly shows the spatial and temporal dynamics of anthropogenic impact on the region's air basin.

Analysis of the data presented shows that the lowest emission density values were recorded in 2020, while the highest values were recorded in 2014. The difference between the minimum and maximum density levels was about 1.4 times, indicating relatively moderate but stable fluctuations in the intensity of anthropogenic load in space.

The decrease in emission density in certain years may be associated with a decline in industrial activity, a reduction in transport flows, and the implementation of environmental protection measures. At the same time, periods of elevated values reflect an increase in anthropogenic pressure on the atmospheric basin, which requires tighter control over sources of pollution and improvement of the environmental monitoring system.

To assess the real anthropogenic load on the population, it is advisable to use relative indicators that take into account not only the total volume of emissions but also the number of inhabitants in the territory. Such indicators allow for a better reflection of the potential impact of pollution on humans and enable accurate interannual comparisons.

One of the informative indicators characterizing the environmental load is the volume of pollutant emissions per capita per year. This indicator is illustrative because it allows assessing the conditional "share" of pollution attributable to each inhabitant of the region. Given that 1 liter of air weighs approximately 0.001225 kg, even relatively small concentrations of pollutants become significant when converted to annual human air consumption.

In some years, emissions per person in the Zhytomyr region reached about 70 kg per year, which is equivalent to approximately 192 g per day. These values indicate a significant level of anthropogenic load and potential risks to public health. The dynamics of changes in this indicator over the last twenty years are shown in Figure 8. Analysis of time series shows that the minimum emissions per capita were recorded in 2000, while the maximum were recorded in 2013. The difference between the minimum and maximum levels was about 1.6 times. The identified pattern is consistent with the dynamics of total emissions, in particular with their peak values in 2013 (Fig. 8), which confirms the close relationship between absolute and relative pollution indicators.

The results obtained emphasize the expediency of using the per capita emissions indicator as an important tool for environmental assessment, which allows for a more objective analysis of changes in anthropogenic pressure and the formulation of scientifically sound recommendations for reducing pollution levels.

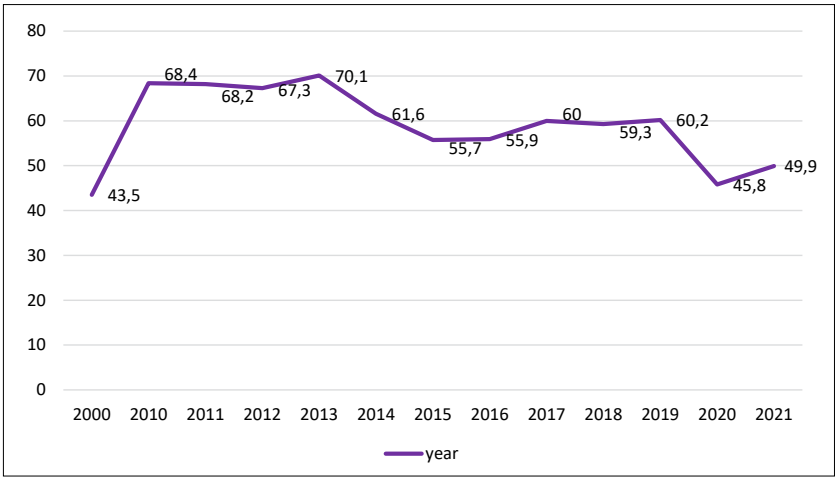


Fig. 8. Emissions in the atmospheric basin of Zhytomyr region (kg per person)

CONCLUSIONS

Assessment of the state of the atmospheric environment is one of the key indicators of a region's environmental well-being and an essential component of the environmental safety system. It enables not only the recording of current pollution levels but also the identification of priority areas for environmental protection activities aimed at reducing anthropogenic pressure on the environment. The application of a set of absolute and relative pollution indicators provides a more comprehensive and objective assessment of the impact of various groups of emission sources on ambient air quality, ecosystems, and public health.

The results of long-term studies confirm that atmospheric pollution is not only local in nature but also transregional and global, which necessitates coordinated actions at both national and international levels. In this context, compliance with environmental standards and the implementation of environmentally oriented approaches in the industrial, transport, and energy sectors become particularly relevant. An analysis of emission dynamics within Zhytomyr Oblast over the past twenty years has demonstrated a persistent trend of mobile pollution sources dominating over stationary ones, leading to the formation of elevated concentrations of carbon monoxide, particulate matter, and potentially carcinogenic compounds in the near-surface layer of the atmosphere.

It was established that the most strained environmental situation in terms of atmospheric pollution was observed in 2013, while the minimum values were recorded in 2020, reflecting the influence of socio-economic and technogenic factors on emission formation. An analysis of specific pollution indicators calculated per capita confirms the identified patterns and indicates a close relationship between total emission volumes and the level of individual environmental burden on the region's population. This situation has direct consequences for human health, the functioning of biota, and the stability of natural ecosystems.

The generalized results of the study indicate the need to apply an integrated and systemic approach to reducing anthropogenic impacts on the atmospheric environment. This includes modernization of transport infrastructure, development of environmentally friendly modes of transport, implementation of advanced emission reduction and air purification technologies, realization of regional environmental programs, as well as strengthening state and public control over compliance with ambient air quality standards.

Systematic monitoring of the air basin and analysis of its spatio-temporal dynamics at the regional level provide a scientific basis for the development of well-grounded management decisions aimed at improving the environmental situation, enhancing the quality of life of the population, and ensuring the sustainable development of territories.

SUMMARY

The current state of the environment has a direct impact on human health and the functioning of ecosystems, and atmospheric air is one of the key components of the environment. Increased anthropogenic pressure, in particular emissions of harmful substances from stationary and mobile sources, causes degradation of the air basin, negatively affects biota, and contributes to the development of diseases in the population. Monitoring the volume and composition of emissions in regions with developed transport and industrial infrastructure is a particularly pressing issue.

The aim of the study was to investigate the ecological state of the atmospheric basin of the Zhytomyr region, analyze the dynamics of air pollution, and assess the impact of stationary and mobile sources on air quality. Analytical review, descriptive and comparative analysis, statistical and cartographic methods, as well as assessment of emissions per capita were used.

The results of the study showed that over the past two decades, emissions from mobile sources have consistently exceeded emissions from stationary sources by 3.5–4 times. The highest pollution levels were recorded in

2013, and the lowest in 2020. The main source of pollution remains motor transport, with carbon oxides and particulate matter dominating its emissions. The amount of pollution per capita demonstrates the level of pressure on the atmosphere from various sources of pollution. The study confirmed the significant impact of anthropogenic factors on the state of the atmosphere and emphasized the need for continuous monitoring and implementation of measures to reduce air pollution.

The data obtained can be used to improve state environmental control, develop regional air protection programs, and plan measures to minimize the negative impact on the population and the environment.

Bibliography

1. Anthropogenic modifications: impacts and conservation strategies / A. Belgrano, F. Cucchiella, D. Jiang, M. Rotilio. *Scientific reports.* 2023. Vol. 13, № 1. 12009. https://doi.org/10.1038/s41598-023-38940-x

2. Analysis of anthropogenic impact on the environment, measures to reduce it, and waste management / N. A. Eremeeva, O. A. Savoskina, L. M. Poddymkina et al. *Frontiers in bioengineering and biotechnology.* 2023. Vol. 11. 1114422. https://doi.org/10.3389/fbioe.2023.1114422

3. Foysal M. J., Neilan B. A., Timms V. The impact of anthropogenic activities on antimicrobial and heavy metal resistance in aquatic environments. *Applied and environmental microbiology.* 2025. Vol. 91, 4. e0231724. https://doi.org/10.1128/aem.02317-24

4. Wood Hansen O., van den Bergh J. Environmental problem shifting from climate change mitigation: A mapping review. *PNAS nexus.* 2023. Vol. 3, № 1. pgad448. https://doi.org/10.1093/pnasnexus/pgad448

5. Climate change, biodiversity loss, and Indigenous Peoples' health and wellbeing: a systematic umbrella review protocol / L. J. Brubacher, T. T. Chen, S. Longboat et al. *Systematic reviews.* 2024. Vol. 13, № 1. P. 8. https://doi.org/10.1186/s13643-023-02423-x

6. Interconnecting global threats: climate change, biodiversity loss, and infectious diseases. The Lancet / A. Pfenning-Butterworth, L. B. Buckley, J. M. Drake et al. *Planetary health.* 2024. Vol. 8, № 4. P. 270–283. https://doi.org/10.1016/S2542-5196(24)00021-4

7. Бузунко О. А. Функції держави із забезпечення судового захисту екологічних прав громадян. *Юридичний вісник.* 2021. № 1. С. 235–240. https://doi.org/10.32837/yuv.v0i1.2104

8. Buzunko O., Krasnova Y. Features of Judicial Protection of Environmental Rights of Citizens in the European Court of Human Rights. *Law. Human. Environmen,* 2022. Vol. 13, № 2. P. 7–16. https://doi.org/10.31548/law2022.02.001

9. Мельниченко О. А., Макарова В. І., Старусева В. В. Екологічна безпека: значення та взаємозв'язок з іншими складовими національної безпеки. *Національні інтереси України.* 2025. № 5 (10). С. 1164–1173. https://doi.org/10.52058/3041-1793-2025-5(10)-1164-1173

10. Заржицький О. С. Актуальні проблеми правового забезпечення екологічної політики України (теоретичні аспекти) : монографія. Дніпропетровськ : Національний гірничий університет, 2012. 200 с.

11. Ващишин М. Я. Екологічне право vs право довкілля. *Юридичний науковий електронний журнал.* 2024. № 6. С. 171–175. https://doi.org/10.32782/2524-0374/2024-6/41Ф

12. Ващенко С., Носаченко В. Державна політика у сфері екологічної безпеки. *Публічне управління: концепції, парадигма, розвиток, удосконалення.* 2024. № 7. С. 14–21. https://doi.org/10.31470/2786-6246-2024-7-14-21

13. Андрійко О. Ф., Кисіль Л. Є. Адміністративно-правове забезпечення реалізації прав і свобод громадян в Україні. *Часопис Київського університету права.* 2015. № 3. С. 107–110.

14. Green infrastructure and relationship with urbanization – Importance and necessity of integrated governance / N. V. Miroshnyk, A. F. Lichanov, T. O. Grabovska et al. *Land Use Policy.* 2021 № 114. 105941. https://doi.org/10.1016/j.landusepol.2021.105941

15. Кондратьєва К. А. Актуальні дослідження у галузі правового регулювання екологічної безпеки в сільському господарстві. *Юридична Україна.* 2011. № 7. С. 37–41.

16. Krohs U., Zimmer M. Do ecosystems have functions?. *Ecology and evolution.* 2023. Vol. 13, № 9. e10458. https://doi.org/10.1002/ece3.10458

17. Regulation in ecological systems: an overview / C. M. Pinto Leite, Í. N. de Carvalho, J. G. D. E. Coutinho, C. N. El-Hani. *History and philosophy of the life sciences.* 2025. Vol. 47, № 4. 58. https://doi.org/10.1007/s40656-025-00707-0

18. Effect of organic farming on insect diversity / T. Grabovska, V. Lavrov, O. Rozputnii et al. *Ukrainian Journal of Ecology.* 2020. Vol. 10, № 4. 96–101. doi 10.15421/2020_174

19. Гетьман А. П. Верховенство права в інституті управління природокористуванням та охороною довкілля. *Екологічне право України. Науково-практичний журнал.* 2017. № 3-4. С. 2–7.

20. Святченко Л. О., Корабльова А. А. Поняття та юридичні ознаки екологічної безпеки у тваринництві. *Право. Людина. Довкілля.* Київ : НУБіП України. 2019. Том 10, № 1. С. 73–82. https://doi.org/10.31548/law2019.01.010

21. Analysis of anthropogenic impact on the environment, measures to reduce it, and waste management / N. A. Eremeeva, O. A. Savoskina,

L. M. Poddymkina et al. *Frontiers in bioengineering and biotechnology.* 2023. Vol. 1. 1114422. https://doi.org/10.3389/fbioe.2023.1114422

22. Rhind S. M. Anthropogenic pollutants: a threat to ecosystem sustainability?. *Philosophical transactions of the Royal Society of London. Series B, Biological sciences.* 2009. Vol. 364, № 1534. 3391–3401. https://doi.org/10.1098/rstb.2009.0122

23. Chandrappa R., Chandra Kulshrestha U. Major Issues of Air Pollution. *Sustainable Air Pollution Management: Theory and Practice.* 2015. P. 1–48. https://doi.org/10.1007/978-3-319-21596-9_1

24. Anthropogenic modifications: impacts and conservation strategies / A. Belgrano, F. Cucchiella, D. Jiang, M. Rotilio. *Scientific reports.* 2023. Vol. 13, № 1. 12009. https://doi.org/10.1038/s41598-023-38940-x

25. Effects of transport-carbon intensity, transportation, and economic complexity on environmental and health expenditures / Z. Hussain, B. Marcel, A. Majeed, R. S. M. Tsimisaraka. *Environment, development and sustainability,* 2023 P. 1–31. Advance online publication. https://doi.org/10.1007/s10668-023-03297-8

26. Belokon K. V. The investigation of the emissions influence from industrial enterprises on pollution of atmospheric air in the zavodskyi district of Zaporizhzhya. *Collection of scholarly papers of Dniprovsk State Technical University (Technical Sciences).* 2018. Vol. 2, № 33. P. 91–96. https://doi.org/10.31319/2519-2884.33.2018.206

27. Osokina N. Modern problems of ukraine's ecology: agricultural pollutants and the quality of drinking water in the city of Kyiv. *Environmental safety and environmental management.* 2024. Vol. 3, № 51. P. 22–27. https://doi.org/10.32347/2411-4049.2024.3.22-27

28. Leaning J. Environment and health: 5. Impact of war. *CMAJ : Canadian Medical Association journal = journal de l'Association medicale canadienne.* 2000. Vol. 163, № 9. P. 1157–1161.

29. Ivanet M., Hordiienko A., Horielyshev S. Analysis of sources of military emergencies and their consequences. *Honor and law.* 2023. Vol. 1 (84). P. 36–43. https://doi.org/10.33405/2078-7480/2023/1/84/276810

30. Environmental consequences of military operations in Ukraine on the example of soil research in the Kharkiv region / O. V. Krainiuk, Y. V. Buts, R. V. Ponomarenko et al. *Journal of Geology, Geography and Geoecology.* 2025. Vol. 34, № 2. P. 304–317. https://doi.org/10.15421/112526

31. Безсонов Є. Вплив «шуму війни» на екосистеми України. *Екологічний вісник.* [Електронний ресурс]. 2022. № 3. С. 25–26.

32. Стрілець Р. Шкода довкіллю. (2024). URL: https://armyinform.com.ua/2023/04/15/shkoda-dovkillyu-vid-vijny-vzhe-perevyshhuye-19-tryljona-gryven-ruslan-strilecz/ (дата звернення: 14.01.2026).

33. Війна і довкілля: заповідники в зоні АТО. *Українська правда.* URL: https://life.pravda.com.ua/society/2015/03/7/190398/ (дата звернення: 14.01.2026).

34. Губарєва В. 500 днів війни: експерти обговорюють вплив війни на довкілля. URL: https://uwecworkgroup.info/uk/500-days-of-war-experts-discuss-the-wars-environmental-impacts/ (дата звернення: 14.01.2026).

35. Омельчук О, Садогурська С. Природа та війна: як військове вторгнення Росії впливає на довкілля України. URL: https://ecoaction.org.ua/pryroda-ta-vijna.html (дата звернення: 15.01.2026).

36. Pirgo O. International and domestic practices for the protection of animals from cruelty in the conditions of armed conflict. *Bulletin of Luhansk Scientific-Educational Institute named after E. O. Didorenko.* 2024. Vol. 3. P. 125–133. DOI: https://doi.org/10.32782/2786-9156.107.3.125-133

37. Dukhnevych A. V., Karpinska N. V. Environmental consequences of war: assessment of waste impact on the environment. *Analytical and Comparative Jurisprudence.* 2025. No. 1. C. 347–352. https://doi.org/10.24144/2788-6018.2025.01.55

38. Бондар О. І., Фінін Г. С., Шевченко Р. Ю. Екологічні виклики воєнного часу: оцінка впливу на довкілля космічними системами дистанційного зондування та GPS-навігації. *Екологічні науки.* 2022. № 4 (43). С. 40–49. https://doi.org/10.32846/2306-9716/2022.eco.4-43.7

39. Лісова Н. О. Вплив військових дій в Україні на екологічний стан території. *Наукові записки Тернопільського національного педагогічного університету імені Володимира Гнатюка. Серія: географія.* 2017. № 43 (2). С. 165–173.

40. Екологічна безпека в умовах воєнного стану / О. М. Семерня, О. І. Любинський, І. В. Федорчук та ін. *Економічні науки: науково-практичний журнал. 2022.* № 2 (41). С. 62–66. DOI https://doi.org/10.32846/2306-9716/2022.eco.2-41.11

41. Перспективи відшкодування екологічної шкоди, спричиненої збройною агресією РФ в рамках міжнародних екологічних угод: посібник / Є. Алексєєва, С. Баран, С. Гольфстрьом та ін. за наук. ред. О. Кравченко, Д. Скрильнікова. Львів : Видавництво «Компанія «Манускрипт»», 2023. 92 с.

42. Іванюта С., Якушенко Л. Пріоритети забезпечення екологічної безпеки України в умовах російської воєнної агресії : аналітична доповідь. *НІСД.* 2024. 61. https://doi.org/10.53679/NISS-analytrep.2024.11

43. The human toll and humanitarian crisis of the Russia-Ukraine war: The first 162 days / U. Haque, A. Naeem, S. Wang et al. *BMJ Global Health.* 2022.Vol. 7, № 9. article number e009550. doi: 10.1136/bmjgh-2022-009550.

44. Екологічні проблеми сільського господарства в умовах воєнного стану / О. Ф. Дунаєвська, І. М. Сокульський, Н. В. Мельник, А. О. Піціль. *Екологічні науки.* 2024. № 1 (52). Т. 1. С. 22–27. https://doi.org/10.32846/2306-9716/2024.eco.1-52.1.3

45. Impact of the full-scale war in Ukraine on the environment: Environmental damage assessment / Yu., Polukarov, N., Kachynska, O., Polukarov et al. *Law. Human. Environment.* 2024. Vol. 15, № 1. P. 85–100. https://doi.org/10.31548/law/1.2024.85.

46. Pipia S. The Effect of Russia's Invasion of Ukraine on Non-Human Animals: International Humanitarian Law Perspectives. *Israel Law Review.* 2024. Vol. 57, № 2. P. 265–287. https://doi.org/10.1017/S0021223724000086

47. Положення про державну систему моніторингу довкілля : Постанова КМУ № 391, 1998. URL: https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/391-98-%D0%BF#Text (дата звернення: 15.01.2026).

48. Оцінка ризику для здоров'я населення від забруднення атмосферного повітря: наказ Міністерства охорони здоров'я України № 89 від 17 січня 2022 р. URL: https://moz.gov.ua/uk/decrees/nakaz-moz-ukraini-vid-17012022--89-pro-zatverdzhennja-metodichnih--rekomendacij-ocinka-riziku-dlja--zdorovja-naselennja-vid-zabrudnennja-atmosfernogo-povitrja (дата звернення: 15.01.2026).

49. Про затвердження Гігієнічного нормативу «Перелік речовин, продуктів, виробничих процесів, побутових та природних факторів, канцерогенних для людини» : наказ МОЗ України від 20.06.2022 № 1054. URL: https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/z0910-22#Text (дата звернення: 15.01.2026).

50. Про затвердження Методики прогнозування наслідків виливу (викиду) небезпечних хімічних речовин під час аварій на хімічно небезпечних об'єктах і транспорті : наказ Міністерства внутрішніх справ України № 1000 від 29.11.2019 р. URL: https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/z0440-20#Text. (дата звернення: 15.01.2026)

51. Методи вимірювання параметрів навколишнього середовища: підручник / Г. І. Гринь, В. І. Мохонько, О. В. Суворін та ін. Сєвєродонецьк : видавництво СНУ ім. В. Даля, 2019. 420 с.

52. ДСТУ ISO 4219:2004. Якість повітря. Визначання газоподібних сірчистих сполук у навколишньому повітрі. Устаткування для відбирання проб (ISO 4219:1979, IDT).

53. Федонюк М. А. До питання удосконалення системи державного екологічного моніторингу стану атмосферного повітря. *Електронний журнал «Державне управління: удосконалення та розвиток».* 2013. № 2. http://www.dy.nayka.com.ua/?op=1&z=541

54. Оцінка екологічного впливу нафтопереробного підприємства на навколишнє середовище України / С. В. Бойченко, О. Г. Пузік,

П. І. Топільницький та ін. *Енергетика: економіка, технології, екологія.* 2016. № 4. С. 109–122.

Петринич В. В., Л. І. Власик Петринич О. А. Свинець: токсикологічні, гігієнічні та біологічні аспекти. *Клінічна та експериментальна патологія.* 2017. Vol. 16, № 2. С. 97–102. https://doi.org/10.24061/1727-4338.XVI.2.60.2017.20

55. Improvement of the current system for atmospheric air quality monitoring in Kyiv according to the EU requirements / I. V. Dvoretska, M. V. Savenets, L. M. Nadtochii et al. *Hydrology, Hydrochemistry and Hydroecology.* 2022. Vol. 3, № 65. P. 105–106. https://doi.org/10.17721/2306-5680.2022.3.8

56. Jones R. L., Ball S. M., Shallcross D. E. Small scale structure in the atmosphere: implications for chemical composition and observational methods. *Faraday discussions.* 2005. Vol. 130. P. 165–524. https://doi.org/10.1039/b502633b

57. McNeill V. F. Atmospheric Aerosols: Clouds, Chemistry, and Climate. *Annual review of chemical and biomolecular engineering.* 2017. Vol. 8. P. 427–444. https://doi.org/10.1146/annurev-chembioeng-060816-101538

58. Schlesinger W. H., Bernhardt E. S. The Atmosphere. *Biogeochemistry.* 2020. P. 51–97. https://doi.org/10.1016/B978-0-12-814608-8.00003-7

59. Direct measurements of the convective recycling of the upper troposphere / P. O. Wennberg, E. Scheuer, J. Dibb et al. *Science (New York, N. Y.).* 2007. Vol. 315, № 5813. P. 816–820. https://doi.org/10.1126/science.1134548

60. Changes in air quality and tropospheric composition due to depletion of stratospheric ozone and interactions with climate / X. Tang, S. R. Wilson, K. R. Solomon et al. *Photochemical & photobiological sciences : Official journal of the European Photochemistry Association and the European Society for Photobiolog.* 2011. Vol. 10, № 2. P. 280–291. https://doi.org/10.1039/c0pp90039g

61. Active atmosphere-ecosystem exchange of the vast majority of detected volatile organic compounds / J. H. Park, A. H. Goldstein, J. Timkovsky et al. *Science (New York, N. Y.). 2013.* Vol. 341 (6146). P. 643–647. https://doi.org/10.1126/science.1235053

62. Volatile chemical products emerging as largest petrochemical source of urban organic emissions / B. C. McDonald, J. A. de Gouw, J. B. Gilman et al. *Science (New York, N. Y.),* Vol. 359 (6377). P. 760–764. https://doi.org/10.1126/science.aaq0524

63. Updates in Air Pollution: Current Research and Future Challenges / D. Vilcins, R. C. Christofferson, J. H. Yoon et al. *Annals of global healt.* 2024. Vol. 90, № 1. P. 9. https://doi.org/10.5334/aogh.4363

64. Environmental and Health Impacts of Air Pollution: A Review / I. Manisalidis, E. Stavropoulou, A. Stavropoulos, E. Bezirtzoglou. *Frontiers in public health.* 2020. Vol. 8. P. 14. https://doi.org/10.3389/fpubh.2020.00014

65. Zahnle K., Schaefer L., Fegley B. Earth's earliest atmospheres. *Cold Spring Harbor perspectives in biology.* 2010. Vol. 2, № 10. a004895. https://doi.org/10.1101/cshperspect.a004895

66. Experimental and simulation study of inert gas mixture inhibiting coal spontaneous combustion / X. Wang, L.Wang, W. Li, D. Liu. *Scientific Reports.* 2024. Vol. 14, 4305. https://doi.org/10.1038/s41598-024-53979-0

67. Specific approach for continuous air quality monitoring / P. Zivkovic, M. A. Tomic, G. S. Ilic et al. *Hemijska industrija..* 2012. Vol. 66, № 1. P. 85–93. https://doi.org/10.2298/HEMIND110525066Z

68. Long-term, continuous air quality monitoring in a cross-sectional study of three UK non-domestic buildings / S. Stamp, E. Burman, C. Shrubsole et al. *Building and Environment.* 2020. Vol. 180, № 24. P. 107071. https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2020.107071

69. Air quality monitoring using statistical learning models for sustainable environment / M. Imam, S. Adam, S. Dev, N. Nesa. *Intelligent Systems with Applications.* 2024. Vol. 22. 200333 https://doi.org/10.1016/j.iswa.2024.200333

70. Кожура Л. О. Адміністративно-правовий захист та охорона: поняття та співвідношення. *Науковий вісник Ужгородського національного університету. Серія «Право».* 2015. Вип. 35. Ч. І. Т. 2. С. 119–122.

71. Рубцова І. Поняття й особливості детермінанти «Охорона атмосферного повітря». *Екологічне право.* 2021. № 6. С. 107–110. https://doi.org/10.32849/2663-5313/2021.6.17

72. Revised analyses of the National Morbidity, Mortality, and Air Pollution Study: mortality among residents of 90 cities / F. Dominici, A. McDermott, M. Daniels et al. *Journal of toxicology and environmental health. Part A.* 2005. Vol. 68 (13-14). P. 1071–1092. https://doi.org/10.1080/15287390590935932

73. Air Pollution and Health: The Need for a Medical Reading of Environmental Monitoring Data / M. Iriti, P. Piscitelli, E. Missoni, A. Miani. *International journal of environmental research and public health.* 2020. Vol. 17, № 7. 2174. https://doi.org/10.3390/ijerph17072174

74. Якість повітря у місті Житомир. URL: https://www.saveecobot.com/maps/zhytomyr (дата звернення: 15.01.2025)

75. Біоіндикаційна оцінка впливу техногенного навантаження від забруднення атмосферного повітря в умовах змін промислової інфраструктури регіону / В. В. Бойко, Л. Д. Пляцук, Л. Г. Філатов, І. О. Трунова. *Вісник КрНУ імені Михайла Остроградського.* 2012. № 73. С. 150–153.

76. Khannanova O. R., Arkanova A. A. Bioindication assessment of the atmospheric air of poltava municipal park. *Biolohiia ta ekolohiia.* 2017. Vol. 3 (1–2). P. 69–75.

77. Identification of an Association of TNFAIP3 Polymorphisms With Matrix Metalloproteinase Expression in Fibroblasts in an Integrative Study of Systemic Sclerosis-Associated Genetic and Environmental Factors / P. Wei, Y. Yang, X. Guo et al. *Arthritis & rheumatology (Hoboken, N. J.)*. 2016. Vol. 68, № 3. P. 749–760. https://doi.org/10.1002/art.39476

78. Вплив ксенобіотиків у повітрі на перебіг ангіопатії у щурів з моделлю системного аутоімунного ревматичного захворювання / Є. Д. Єгудіна, Г. С. Такташов, В. Я. Мікуксте ті ін. *Здобутки клінічної і експериментальної медицини.* 2017. № 1. С. 32–37. https://doi.org/10.11603/1811-2471.2017.v0.i1.7335

79. Patseva I., Kahukina A. Analysis of the atmospheric air state in the city of Zhytomyr. *Sloboda Scientific Journal. Natural Sciences.* 2024. Vol. 1. P. 77–81. https://doi.org/10.32782/naturalspu/2024.1.10

Information about the authors:
Dunaievska Oksana Feliksivna,
Doctor of Biological Sciences,
Professor at the Department of Ecology,
Polissia National University
7, Staryi Boulevard, Zhytomyr, 10002, Ukraine

Sokulskiy Ihor Mykolayovych,
Candidate of Veterinary Sciences,
Associate Professor at the Department of internal pathology and morphology,
Polissia National University
7, Staryi Boulevard, Zhytomyr, 10002, Ukraine

Hutyy Bohdan Volodymyrovych,
Doctor of Veterinary Sciences, Professor,
Head of the Department of Hygiene, Sanitation and General Veterinary Prevention named after Mykhailo Demchuk,
Stepan Gzhytskyi National University of Veterinary Medicine and Biotechnologies Lviv
50, Pekarska street, Lviv, 79010, Ukraine

CHAPTER 6

ECOLOGICAL-COENOTIC DIFFERENTIATION OF SYNTAXA OF THE CLASS CARPINO-FAGETEA SYLVATICAE OF THE LEFT-BANK FOREST-STEPPE OF UKRAINE ACCORDING TO PHYTOINDICATION PARAMETERS

Kalinskyi P. V., Goncharenko I. V., Drebot O. I.
DOI https://doi.org/10.30525/978-9934-26-654-6-6

INTRODUCTION

Forest vegetation of the *Carpino-Fagetea sylvaticae* class is one of the leading components of the natural ecosystems of the Left-Bank Forest-Steppe of Ukraine[1]. This class unites groups of moderately humid and humid broad-leaved and mixed forests, which are formed under conditions of sufficient moisture, developed soil cover and relatively stable microclimate. Within the region, such forests are confined mainly to well-drained floodplain terraces and elevated relief elements, where natural conditions contribute to the development of nemoral woody vegetation[2]. They play an important role in shaping the landscape structure and ensuring ecosystem functions, in particular regulating the water regime, maintaining soil fertility and stabilizing microclimatic conditions[3].

At the same time, long-term anthropogenic impact has significantly transformed most of the forest communities of the *Carpino-Fagetea sylvaticae* class in the Left-Bank Forest-Steppe. Forest use, changes in the hydrological regime, development of territories and recreational load have led to the fragmentation of phytocenoses and disruption of their species-coenotic organization. Under such conditions, the study of ecological factors that determine the conditions for the formation, differentiation and stability of forest syntaxa of the region becomes particularly relevant.

[1] Фельбаба-Клушина Л. М. Продромус рослинності України : монографія. Київ : Наук. думка, 2019. 782 с.

[2] Гончаренко І. В. Аналіз рослинного покриву північно-східного Лісостепу України. *Укр. фітоценол. зб. Сер. А*. 2003. Вип. 1 (19). С. 1–203.

[3] Оптимізація екологічних функцій, територіального розподілу, використання та охорони полезахисних лісових смуг агросфери України (стан, структура, репрезентативність, фітострома) : метод. рек. / В. В. Коніщук та ін. Київ : Agroecology and Environmental Management NAAN, 2024. 82 с. DOI: https://doi.org/10.33730/978-617-7785-61-2

In addition to their high cenotic and floristic diversity, forest communities of the Carpino-Fagetea sylvaticae class are characterized by pronounced ecological heterogeneity, which is reflected in the variability of edaphic, hydrological and microclimatic conditions within the Left-Bank Forest-Steppe. Gradients of soil moisture, trophicity and aeration, combined with differences in relief position and groundwater depth, determine a wide spectrum of habitat conditions and, consequently, a significant differentiation of forest syntaxa. This ecological variability creates preconditions for the coexistence of forest communities with different ecological strategies and levels of tolerance to environmental factors, making the class a convenient model for studying patterns of ecological differentiation and stability of nemoral forest vegetation.

Phytoindication methods are an effective tool for analyzing the ecological conditions for the formation of vegetation and have been widely used in geobotanical studies of the Left-Bank Forest-Steppe since the early 1990s. The development of this direction in Ukraine is associated with the works of Ya.P. Didukh[4] and his scientific school, within which the theoretical and methodological foundations of synphytoindicative research of forest vegetation were laid[5, 6]. Further work has demonstrated the informativeness of phytoindication scales for assessing the role of edaphic and climatic factors in the differentiation of forest communities of both natural and anthropogenically transformed origin[7, 8].

Modern research has significantly expanded the range of phytoindication analysis objects, covering various types of forest stands, including artificial and secondary groups characteristic of the forest-steppe zone[9, 10, 11].

---

[4] Дідух Я. П., Плюта П. Г. Фітоіндикація екологічних факторів. Київ : Наук. думка, 1994. 280 с.

[5] Дідух Я. П. Методологічні підходи до проблем фітоіндикації екологічних факторів. *Укр. ботан. журн.* 1990. Т. 47, № 6. С. 5–12.

[6] Дідух Я. П., Ємшанов Д. Г., Школьніков Ю. А. Використання фітоіндикаційних оцінок при вивченні структури лісових екосистем. *Укр. ботан. журн*. 1997. Т. 54, № 1. С. 47–56.

[7] Вакал А. П., Дідух Я. П. Фітоіндикаційна характеристика природних умов околиць міста Суми. *Укр. ботан. журн.* 1991. Т. 48, № 5. С. 57–61.

[8] Гончаренко І. В. Рослинність заказника «Підліснівський» (Сумська область) та її фітоіндикаційний аналіз. *Укр. фітоценол. зб. Сер. С : Фітоекологія.* 2003. Вип. 1 (20). С. 98–102.

[9] Голик Г. М., Гончаренко І. В. Синтаксономія деревної рослинності м. Києва, її синфітоіндикаційний аналіз та антропогенна трансформація. *Екологія та ноосферологія*. 2017. Т. 28, № 1–2. С. 49–63.

[10] Goncharenko I. V., Solomakha I. V., Shevchyk V. L. et al. A phytoindicational assessment of the vegetation of afforestation belts in the Middle Dnipro Region, Ukraine. *Environmental & Socio-economic Studies*. 2022. Vol. 10 (2). P. 30–39. DOI: https://doi.org/10.2478/environ-2022-0009

[11] Бондарук М. А., Целіщев О. Г. Фітоіндикація едафічних режимів екотопів лісових екосистем Лівобережно-Дніпровського лісостепового округу України. *Лісівництво і агролісомеліорація*. 2018. Вип. 132. С. 94–104. DOI: https://doi.org/10.33220/1026-3365.132.2018.94

The results obtained indicate the decisive influence of soil and climatic regimes on the ecological differentiation of forest syntaxa, however, most of the available works are focused on individual local territories or narrow groups of phytocenoses.

In this regard, it is relevant to conduct a comprehensive ecological-coenotic analysis of syntaxa of forest vegetation of the *Carpino-Fagetea sylvaticae* class within the Left-Bank Forest-Steppe of Ukraine using phytoindication approaches. Such studies contribute to the clarification of the ecological amplitudes of forest communities, deepening the understanding of their spatial-ecological differentiation and creating scientific prerequisites for substantiating measures for the conservation and rational management of forest ecosystems in the region.

The aim of this study is to perform hierarchical clustering of syntaxa of the *Carpino-Fagetea sylvaticae* class of the Left-Bank Forest-Steppe of Ukraine based on phytoindication parameters and further analysis of the obtained dendrogram in order to identify the structure of their ecological differentiation. The main attention is paid to the interpretation of the dendrogram as an integral reflection of the similarity of syntaxa according to the set of soil-hydrological and climatic factors, to determine the optimal number of generalized ecological clusters, as well as to analyze the position of individual syntaxa (№ 1–50) within the formed groups. This approach allows us to deepen the understanding of the ecological relationships between syntaxa, characterize their relative ecological niches and assess the degree of ecological homogeneity and delimitation of forest groups reflected in the structure of the dendrogram.

1. Materials and methods of research

1.1. Characteristics of the conditions of the research region

The Left-Bank Forest-Steppe of Ukraine is one of the key physical-geographical and geobotanical components of the forest-steppe zone of Eastern Europe. Territorially, it is located within the left-bank part of the Dnieper basin and extends from north to south between Polissya and the steppe zone, forming a transitional zone with a high level of natural diversity. Within this region, elements of different natural zones are combined, which determines the complex spatial organization of landscapes and a significant variety of ecological conditions[12, 13].

[12] Національний атлас України / редкол.: Л. Г. Руденко (голова) та ін. Київ : ДНВП «Картографія», 2007. 440 с.

[13] Іваненко Є. І. Комплексне природне районування України : історико-картографічний огляд. *Фізична географія та геоморфологія*. 2015. Вип. 1. С. 12–22.

The geomorphological structure of the Left-Bank Forest-Steppe is characterized by a combination of watershed plains, undulating loess plateaus, terraced valleys of large and small rivers, as well as the remains of ancient accumulative landforms. Such a variety of orographic conditions determines the heterogeneity of soil cover, hydrological regime and microclimatic characteristics, which directly affects the formation of plant cover and spatial differentiation of forest groups[14, 15]. In geobotanical terms, the region encompasses several districts that differ in floristic composition, structure of plant communities, and degree of participation of zonal and intrazonal vegetation types[16].

The climate of the Left-Bank Forest-Steppe belongs to the moderately continental type and is characterized by pronounced seasonality, which is manifested in clear annual fluctuations in air temperature and the amount of atmospheric precipitation. Winters are usually moderately cold, with unstable snow cover, while the summer period is marked by fairly high temperatures and uneven distribution of precipitation. Within the region, a gradient of climatic conditions is observed in the direction from north to south, which causes a gradual increase in the continentality of the climate, a decrease in humidity and an increase in the duration of the warm period. Such climate features create diverse ecological prerequisites for the formation of broad-leaved and mixed forests, and also determine their sensitivity to changes in thermal and water regimes[17].

The soil cover of the Left-Bank Forest-Steppe has a pronounced mosaic structure, reflecting the complex history of soil formation under conditions of variable climate, relief and vegetation cover. On the watershed plains and gentle slopes, typical and degraded black soils are most common, which were formed under meadow-steppe and forest-steppe vegetation. In the southern part of the region, a significant area is occupied by dark-gray forest soils associated with the spread of broad-leaved forests and characterized by relatively higher acidity and a different ratio of humus horizons[18, 19].

---

[14] Географічна енциклопедія України : у 3 т. / редкол.: О. М. Маринич (відп. ред.) та ін. Київ : УРЕ ім. М. П. Бажана, 1993. Т. 3 : П–Я. 480 с.

[15] Національний атлас України / редкол.: Л. Г. Руденко (голова) та ін. Київ : ДНВП «Картографія», 2007. 440 с.

[16] Геоботанічне районування Української РСР / Г. І. Білик, Є. М. Брадіс, М. А. Голубець та ін. Київ : Наук. думка, 1977. 304 с.

[17] Географічна енциклопедія України : у 3 т. / редкол.: О. М. Маринич (відп. ред.) та ін. Київ : УРЕ ім. М. П. Бажана, 1990. Т. 2 : З–О. 480 с.

[18] Крупский Н. К., Полупан Н. И. Атлас почв Украинской ССР. Киев : Урожай, 1979. 160 с.

[19] Географічна енциклопедія України : у 3 т. / редкол.: О. М. Маринич (відп. ред.) та ін. Київ : УРЕ ім. М. П. Бажана, 1989. Т. 1 : А–Ж. 416 с.

1.2. Research materials

The material basis of the study was synoptic and complete phytocenotic description tables published in works devoted to the study of the vegetation of broad-leaved forests of the Left-Bank Forest-Steppe of Ukraine. A representative array of literary sources covering different parts of the region and reflecting the current state of syntaxonomic studies of forest vegetation was involved in the analysis.

In particular, materials published by O. M. Bayrak[20, 21], I. V. Solomakha et al.[22], V. L. Shevchyk and O. D. Polishko[23], I. V. Goncharenko[24, 25], Ye. O. Vorobyov[26], L. M. Gomlya[27], V. A. Onyshchenko[28], D. A. Davydov[29], O. Yu. Smagliuk, N. O. Smoliar and V. A. Solomakha[30, 31, 32] were used. The mentioned works contain detailed descriptions of the floristic composition, community structure, and ecological conditions of their formation.

From the above list of sources, data on the full species composition and ecological characteristics of 50 syntaxa of the *Carpino-Fagetea* class were

---

[20] Байрак О. М. Синтаксономія широколистяних лісів Лівобережного Придніпров'я. *Укр. фітоценол. зб. Сер. А.* 1996. Вип. 3 (3). С. 51–63.

[21] Байрак О. М. Фітоценотична характеристика заплавних лісів Лівобережного Придніпров'я. *Укр. фітоценол. зб. Сер. А*. 1997. Вип. 1 (6). С. 45–51.

[22] Соломаха І. В., Сенчило О. О., Колот О. М., Войтюк Б. Ю. Лісова рослинність Чорнухівщини (Полтавська область). *Укр. фітоценол. зб. Сер. А*. 1997. Вип. 2 (7). С. 80–88.

[23] Шевчик В. Л., Полішко О. Д. Синтаксономія рослинності ділянки борової тераси (Ліплявське лісництво Черкаської області). *Укр. фітоценол. зб. Сер. А*. 2000. Вип. 16 (1). С. 67–89.

[24] Гончаренко І. В. Аналіз рослинного покриву північно-східного Лісостепу України. *Укр. фітоценол. зб. Сер. А*. 2003. Вип. 1 (19). С. 1–203.

[25] Гончаренко І. В. Флористична класифікація лісів лісостепової Сумщини. *Укр. фітоценол. зб. Сер. А*. 2001. Вип. 1 (17). С. 3–17.

[26] Воробйов Є. О. Попередній продромус суходольних лісів та рідколісь природного та штучного походження з переважанням або помітною участю *Pinus sylvestris* L. s.l. рівнинної частини України. Рослинність хвойних лісів України. Київ : Фітосоціоцентр, 2003. С. 13–42.

[27] Гомля Л. М. Рослинність долини річки Хорол. *Укр. фітоценол. зб*. Київ, 2005. С. 3–186.

[28] Onyshchenko V. A. Forests of order *Fagetalia sylvaticae* in Ukraine. Kyiv : Alterpress, 2009. 212 p.

[29] Давидов Д. А. Лісова рослинність Роменсько-Полтавського геоботанічного округу (Україна): синтаксономія, антропогенні зміни та охорона : дис. … канд. біол. наук : 03.00.05 / Ін-т ботаніки ім. М. Г. Холодного НАН України. Київ, 2012. 408 с.

[30] Смаглюк О. Ю., Соломаха В. А. Флористична класифікація мезофільних широколистяних лісів союзу *Carpinion betuli* Issl. em. Oberd. 1953 у басейні нижньої течії річки Сули. *Вісник Черкаського університету. Сер.: Біологічні науки.* 2015. № 19. С. 98–109.

[31] Solomakha V., Smoliar N., Smagliuk O. Floristic classification of the floodplain alder, willow and poplar forests in the basin of the lower Sula (Ukraine). *Вісник Київського національного університету імені Тараса Шевченка. Сер. : Біологія*. 2016. Вип. 2. С. 33–44.

[32] Смаглюк О. Ю., Смоляр Н. М., Соломаха В. А. Флористична класифікація мезофільних кленово-липово-дубових лісів у басейні нижньої Сули (Україна). *Вісник Львівського університету. Сер.: Біологічна.* 2017. Вип. 75. С. 23–34.

selected for further analysis. Among them, 27 syntaxa correspond to the rank of associations, while 23 are represented by subassociations and variants that reflect the internal differentiation of forest communities within the region. In the combined list of species formed on the basis of the analyzed syntaxa, there are a total of 3115 species of vascular plants, which indicates a high level of floristic diversity of the studied vegetation.

1.3. Research methodology

At the initial stage of the study, data on the occurrence of species within individual syntaxa were aggregated and unified. In order to ensure correct comparison between syntaxa, the initial indicators were converted into a percentage format, which allowed to level the influence of a different number of descriptions within individual phytocenotic tables. This approach ensured statistical consistency of the data and created the basis for further calculations of ecological characteristics.

Further analysis was performed using the phytoindication method[33], which is based on the use of ecological scales that reflect the reaction of plant species to the leading abiotic factors of the environment. The study took into account 12 ecological indicators that cover the key parameters of the plant habitat: soil moisture, moisture variability, soil acidity, total salt regime, nitrogen content, air humidity, soil aeration, thermal regime, illumination, climate continentality, cryoclimatic conditions and soil carbonate content. The set of these indicators allows for a comprehensive characterization of the ecological niches of syntaxa and the identification of patterns of their spatial differentiation. To identify similarities between syntaxa by a set of ecological characteristics, the hierarchical clustering method was used. Previously, only numerical ecological variables were selected from the original table, after which the data were standardized by z-transformation in order to eliminate the influence of different dimensionality of the indicators. The matrix of distances between syntaxa was calculated using the Euclidean metric, which is generally accepted in multidimensional ecological analysis. Clustering was carried out using the Ward method (Ward.D2), which minimizes intracluster dispersion and ensures the formation of statistically justified and ecologically interpreted groups. The results of hierarchical clustering are presented in the form of a dendrogram, on which the branches are signed with the corresponding syntaxon numbers. The optimal number of clusters was determined based on the analysis of the dendrogram structure, taking into account the levels of merger and sharp changes in the intercluster distance. Cutting the dendrogram allowed us to identify four

[33] Didukh Y. P. The ecological scales for the species of Ukrainian flora and their use in synphytoindication. Kyiv : Phytosociocentre, 2011. 176 p.

generalized clusters that reflect the main types of ecological differentiation of syntaxa of the *Carpino-Fagetea* class within the Left-Bank Forest-Steppe of Ukraine. All statistical calculations and graphical visualization of the results were performed in the R environment using standard packages for processing tabular data and multivariate statistical analysis, which ensured the reproducibility and transparency of the results obtained.

2. Results and their discussion

Hierarchical clustering of syntaxa according to the complex of phytoindication parameters, performed by the Ward method using Euclidean distance, revealed a clear ecological differentiation of forest communities. The dendrogram reflects the grouping of syntaxa according to the gradients of moisture, trophicity and climatic conditions, while syntaxa of one syntaxonomic union mainly form compact clusters, which indicates the ecological integrity of the corresponding phytocenotic types (Fig. 1.).

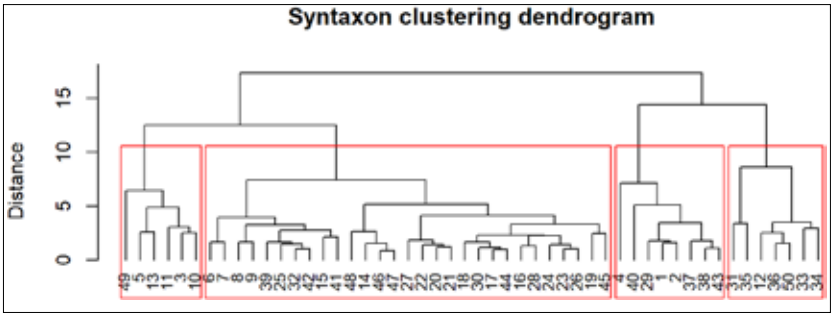


Fig. 1. Dendrogram of hierarchical clustering of syntaxa of the *Carpino-Fagetea sylvaticae* class by the complex of phytoindication parameters

Syntaxon designation: 1. *Aegonychon-Quercetum roboris*[34]; 2. *Melica picta-Quercetum roboris*[35]; 3. *Aceri negundi-Alnetum glutinosae*[36]; 4. *Rubo*

[34] Давидов Д. А. Лісова рослинність Роменсько-Полтавського геоботанічного округу (Україна): синтаксономія, антропогенні зміни та охорона : дис. … канд. біол. наук : 03.00.05 / Ін-т ботаніки ім. М. Г. Холодного НАН України. Київ, 2012. 408 с.

[35] Ibid.

[36] Solomakha V., Smoliar N., Smagliuk O. Floristic classification of the floodplain alder, willow and poplar forests in the basin of the lower Sula (Ukraine). *Вісник Київського національного університету імені Тараса Шевченка. Сер. : Біологія*. 2016. Вип. 2. С. 33–44.

caesii-Alnetum[37]; 5. *Ficario-Ulmetum*[38]; 6. *Luzulo-Quercetum* subass. *dryopteridetosum*[39]; 7. *L.-Q.* subass. *alliariosum*[40]; 8. *Ficario-Ulmetum*[41]; 9. *F.-U.*subass. *typicum*[42]; 10. *F.-U.*subass. *chrysosplenietosum*[43]; 11. *Rubo caesii-Alnetum*[44]; 12. *Melico nutantis-Quercetum roboris*[45]; 13. *Ficario-Ulmetum*[46]; 14. *Luzulo-Quercetum* subass. *dryopteridetosum*[47]; 15. *L.-Q.* subass. *alliariosum*[48]; 16. *Tulipo biebersteinianae-Carpinetum betuli*[49]; 17. *Galeobdoloni luteae-Carpinetum betuli* subass. *sambucetosum nigrae*[50]; 18. *G. L.-C. b*[51]; 19. *Carici pilosae-Carpinetum*[52]; 20. *C. p.-C.*[53]; 21. *Galeobdoloni luteae-Carpinetum* subass. *typicum* var. *Violae reichenbachianae*[54]; 22. *G. l.-C.*[55]; 23. *Tilio-Carpinetum*[56]; 24. *Galeobdoloni luteae-Carpinetum betuli* subass. *betuletosum pendulae*[57]; 25. *G. l.-C. b.*subass.

---

[37] Байрак О. М. Фітоценотична характеристика заплавних лісів Лівобережного Придніпров'я. *Укр. фітоценол. зб. Сер. А*. 1997. Вип. 1 (6). С. 45–51.

[38] Гончаренко І. В. Аналіз рослинного покриву північно-східного Лісостепу України. *Укр. фітоценол. зб. Сер. А*. 2003. Вип. 1 (19). С. 1–203.

[39] Ibid.

[40] Ibid.

[41] Шевчик В. Л., Полішко О. Д. Синтаксономія рослинності ділянки борової тераси (Ліплявське лісництво Черкаської області). *Укр. фітоценол. зб. Сер. А*. 2000. Вип. 16 (1). С. 67–89.

[42] Давидов Д. А. Лісова рослинність Роменсько-Полтавського геоботанічного округу (Україна): синтаксономія, антропогенні зміни та охорона : дис. … канд. біол. наук : 03.00.05 / Ін-т ботаніки ім. М. Г. Холодного НАН України. Київ, 2012. 408 с.

[43] Ibid.

[44] Гомля Л. М. Рослинність долини річки Хорол. *Укр. фітоценол. зб*. Київ, 2005. С. 3–186.

[45] Гончаренко І. В. Аналіз рослинного покриву північно-східного Лісостепу України. *Укр. фітоценол. зб. Сер. А*. 2003. Вип. 1 (19). С. 1–203.

[46] Гончаренко І. В. Флористична класифікація лісів лісостепової Сумщини. *Укр. фітоценол. зб. Сер. А*. 2001. Вип. 1 (17). С. 3–17.

[47] Ibid.

[48] Ibid.

[49] Смаглюк О. Ю., Соломаха В. А. Флористична класифікація мезофільних широколистяних лісів союзу Carpinion betuli Issl. em. Oberd. 1953 у басейні нижньої течії річки Сули. *Вісник Черкаського університету. Сер.: Біологічні науки*. 2015. № 19. С. 98–109.

[50] Ibid.

[51] Байрак О. М. Синтаксономія широколистяних лісів Лівобережного Придніпров'я. *Укр. фітоценол. зб. Сер. А*. 1996. Вип. 3 (3). С. 51–63.

[52] Ibid.

[53] Соломаха І. В., Сенчило О. О., Колот О. М., Войтюк Б. Ю. Лісова рослинність Чорнухівщини (Полтавська область). *Укр. фітоценол. зб. Сер. А*. 1997. Вип. 2 (7). С. 80–88.

[54] Ibid.

[55] Ibid.

[56] Шевчик В. Л., Полішко О. Д. Синтаксономія рослинності ділянки борової тераси (Ліплявське лісництво Черкаської області). *Укр. фітоценол. зб. Сер. А*. 2000. Вип. 16 (1). С. 67–89.

[57] Onyshchenko V. A. Forests of order Fagetalia sylvaticae in Ukraine. Kyiv : Alterpress, 2009. 212 p.

sambucetosum nigrae[58]; 26. *G. l.-C. b.*subass. *typicum*[59]; 27. *G. l.-C. b.* subass. *betuletosum pendulae*[60]; 28. *G. l.-C. b.* subass. *melampyretosum nemorosi*[61]; 29. *Galio-Carpinetum* subass. *poetosum nemoralis*[62]; 30. *G.-C.* subass. *typicum*[63]; 31. *Convallario-Pinetum*[64]; 32. *Melico-Quercetum*[65]; 33. *Melico nutantis-Quercetum*[66]; 34. *Convallario majalis-Quercetum roboris*[67]; 35. *Pteridio-Quercetum*[68]; 36. *Melico nutantis-Quercetum roboris* subass. *typicum*[69]; 37. *Stellario holosteae-Aceretum platanoidis* subass. *typicum*[70]; 38. *S. h.-A. p.* subass. *caricetosum pilosae*[71]; 39. *S. h.-A. p.* subass. *parietosum quadrifoliae*[72]; 40. *S. h.-A. p.*[73]; 41. *S. h.-A. p.*[74]; 42. *S. h.-A. p.*[75]; 43. *S. h.-A. p.* subass. *caricetosum pilosae*[76]; 44. *S. h.-A. p.* subass. *parietosum quadrifoliae*[77];

---

[58] Onyshchenko V. A. Forests of order Fagetalia sylvaticae in Ukraine. Kyiv : Alterpress, 2009. 212 p.

[59] Давидов Д. А. Лісова рослинність Роменсько-Полтавського геоботанічного округу (Україна): синтаксономія, антропогенні зміни та охорона : дис. … канд. біол. наук : 03.00.05 / Ін-т ботаніки ім. М. Г. Холодного НАН України. Київ, 2012. 408 с.

[60] Ibid.

[61] Ibid.

[62] Гомля Л. М. Рослинність долини річки Хорол. *Укр. фітоценол. зб*. Київ, 2005. С. 3–186.

[63] Ibid.

[64] Воробйов Є. О. Попередній продромус суходольних лісів та рідколісь природного та штучного походження з переважанням або помітною участю Pinus sylvestris L. s.l. рівнинної частини України. Рослинність хвойних лісів України. Київ : Фітосоціоцентр, 2003. С. 13–42.

[65] Смаглюк О. Ю., Смоляр Н. М., Соломаха В. А. Флористична класифікація мезофільних кленово-липово-дубових лісів у басейні нижньої Сули (Україна). *Вісник Львівського університету. Сер.: Біологічна*. 2017. Вип. 75. С. 23–34.

[66] Шевчик В. Л., Полішко О. Д. Синтаксономія рослинності ділянки борової тераси (Ліплявське лісництво Черкаської області). *Укр. фітоценол. зб. Сер. А*. 2000. Вип. 16 (1). С. 67–89.

[67] Ibid.

[68] Давидов Д. А. Лісова рослинність Роменсько-Полтавського геоботанічного округу (Україна): синтаксономія, антропогенні зміни та охорона : дис. … канд. біол. наук : 03.00.05 / Ін-т ботаніки ім. М. Г. Холодного НАН України. Київ, 2012. 408 с.

[69] Ibid.

[70] Ibid.

[71] Ibid.

[72] Ibid.

[73] Гончаренко І. В. Аналіз рослинного покриву північно-східного Лісостепу України. *Укр. фітоценол. зб. Сер. А*. 2003. Вип. 1 (19). С. 1–203.

[74] Гончаренко І. В. Флористична класифікація лісів лісостепової Сумщини. *Укр. фітоценол. зб. Сер. А*. 2001. Вип. 1 (17). С. 3–17.

[75] Смаглюк О. Ю., Смоляр Н. М., Соломаха В. А. Флористична класифікація мезофільних кленово-липово-дубових лісів у басейні нижньої Сули (Україна). *Вісник Львівського університету. Сер.: Біологічна*. 2017. Вип. 75. С. 23–34.

[76] Onyshchenko V. A. Forests of order Fagetalia sylvaticae in Ukraine. Kyiv : Alterpress, 2009. 212 p.

[77] Onyshchenko V. A. Forests of order Fagetalia sylvaticae in Ukraine. Kyiv : Alterpress, 2009. 212 p.

45. *Aegonychon-Quercetum roboris*[78]; 46. *Mercuriali perennis-Fraxinetum excelsioris*[79]; 47. *Stellario holosteae-Aceretum platanoidis*[80]; 48. *Convallario-Padietum*[81]; 49. *C.-P.* subass. *equisetosum hyemali*[82]; 50. *Pteridio aquilini-Quercetum roboris*[83].

The optimal number of clusters was determined based on a comprehensive analysis of the hierarchical clustering dendrogram, constructed using the Ward method, which minimizes intragroup variance and ensures the formation of the most ecologically consistent clusters. The key criterion for cluster selection was the sharp increases in the height of the merger, which are interpreted as a significant increase in the intercluster distance and, accordingly, as the boundary between qualitatively different ecological groups. Cutting the dendrogram at the level preceding the maximum jump in this indicator made it possible to reasonably distinguish four generalized ecological groups of syntaxa. These clusters reflect the leading ecological gradients of moisture and trophicity of the environment, which are decisive for the spatial differentiation of forest vegetation of the Left-Bank Forest-Steppe.

Further detailing of the dendrogram structure by deeper branching of clusters did not lead to the identification of new, ecologically independent types of groups, but only reflected the internal variability of syntaxa within one ecological regime. This indicates the adequacy of the selected level of clustering and confirms that it is the four clusters that most fully represent the main directions of ecological differentiation of the studied groups.

The syntaxa of cluster I are characterized by close values of phytoindication parameters of moisture, soil aeration and thermal regime, which indicates the formation of the corresponding groups in relatively humid, well-drained habitats under moderately warm climatic conditions. The majority of syntaxa of this group are characterized by increased values of soil and air moisture in combination with average indicators of acidity and mineral nitrogen supply. This set of ecological features is consistent with their localization to lowered relief elements, thalwegs of ravines, river floodplains, and transitional forms between floodplain and suprafloodplain terraces. The small number of syntaxa

[78] Байрак О. М. Синтаксономія широколистяних лісів Лівобережного Придніпров'я. *Укр. фітоценол. зб. Сер. А*. 1996. Вип. 3 (3). С. 51–63.

[79] Ibid.

[80] Ibid.

[81] Ibid.

[82] Байрак О. М. Фітоценотична характеристика заплавних лісів Лівобережного Придніпров'я. *Укр. фітоценол. зб. Сер. А*. 1997. Вип. 1 (6). С. 45–51.

[83] Байрак О. М. Синтаксономія широколистяних лісів Лівобережного Придніпров'я. *Укр. фітоценол. зб. Сер. А*. 1996. Вип. 3 (3). С. 51–63.

within the cluster and their compact grouping on the dendrogram indicate the relative ecological homogeneity of this group, despite certain differences in the floristic composition of individual associations.

Cluster II is the most numerous and unites syntaxa that are formed mainly in mesophilic conditions with average or moderately elevated moisture and trophic indices. Phytoindicative values within this cluster vary in a relatively narrow range, which determines their unification into one generalized ecological group. At the same time, the internal structural heterogeneity of the cluster reflects the different position of syntaxa along the gradients of soil moisture and mineral nutrition. It includes groups of different genesis, floodplain, ravine ecotopes, terrace and plateau, which determines the breadth of the ecological amplitude of this group. Despite this, the dendrogram records common features of their ecological organization, primarily in terms of mineral nitrogen content, acidity and soil aeration regime.

Syntaxa of cluster III are characterized by relatively lower values of moisture and trophicity indicators than in clusters I and II, as well as slightly reduced thermal values. This indicates their confinement to better drained ecotopes, mainly associated with the upper and middle parts of slopes, as well as plateau areas. The compactness of this cluster on the dendrogram indicates the proximity of the ecological niches of the syntaxa, even if they belong to different syntaxonomic units of higher rank. The internal structure of the cluster reflects a gradual transition from more mesophilic to relatively xerophilic conditions without clearly defined ecological boundaries, which is characteristic of slope and plateau forest ecotopes of the Forest-Steppe.

Cluster IV unites syntaxa, which are characterized by a combination of moderate or reduced moisture with relatively poorer soils and increased continentality of conditions. The indicators of acidity, mineral nitrogen content and air humidity within this cluster are generally lower compared to clusters I–II, which is consistent with the localization of the groups to floodplain terraces, sandy and sandy loam soils, as well as pine complexes. At the same time, the thermal parameters remain within the limits typical for the forest-steppe zone, which determines a clear, but not marginal separation of the cluster on the dendrogram. In general, this group is characterized by sufficient internal ecological coherence and represents a specific type of forest groups adapted to relatively drier and oligotrophic conditions.

Further detailed analysis of each cluster taking into account the specific composition of syntaxa confirms the consistency of the clustering with the ecotopic and phytoindication characteristics of the groups.

Cluster I unites syntaxa № 3, 5, 10, 11, 13 and 49, which are characterized by similar ecological and coenotic parameters and are confined to low-lying, well-moistened elements of the forest landscape. According to the soil moisture index, these groups cover the interval from mesophytic to hygro-mesophytic conditions, which corresponds to formation on fresh and moist soils with full or periodically excessive moisture. This characteristic is consistent with the ecotopic confinement of syntaxa № 3, 10 and 11 to river floodplains, low-lying areas and thalwegs of deep forest gullies with close groundwater levels.

The indicators of moisture variability reflect the predominance of hemihydrocontrastphobic conditions, characteristic of floodplain and lowland ecotopes with moderately uneven water regime. The aeration regime of the soils corresponds to hemiaerophobic conditions, which indicates the development of communities on moderately aerated, often moistened substrates. The acidity of the soil environment is characterized by subacidophilic values, typical of weakly acidic sod-podzolic and gray forest soils.

According to the general salt regime, the syntaxa of the cluster correspond to mesotrophic and semi-eutrophic conditions, which is consistent with well-moistened, but not saline soils. Mineral nitrogen availability varies from heminitrophilic to nitrophilic conditions and is most pronounced in syntaxa № 3 and 49, confined to floodplain forests. The carbonate regime indicates the formation of communities mainly on non-or weakly carbonate substrates.

Climatic indicators within the cluster are relatively homogeneous: the thermal regime corresponds to submicrothermal conditions, the continentality of the climate, to the hemioceanic type, and the cryo-regime, to subcryophytic conditions with moderate severity of winters. Atmospheric humidification is characterized by subaridophytic values with relatively high air humidity, which is consistent with the location in floodplains and lowlands. The light regime corresponds to hemisciophytic conditions, typical of closed or semi-closed deciduous and alder forests.

Thus, cluster I represents a group of floodplain and lowlands broadleaf and alder forest communities, united by conditions of increased moisture, moderate trophicity, and a relatively stable microclimate, which is clearly reflected both in phytoindication parameters and in the ecotopic characteristics of syntaxa № 3, 5, 10, 11, 13, and 49.

Cluster II includes syntaxa № 6, 7, 8, 9, 14–28, 30, 32, 39, 41, 42, 44–48 and represents mesophilic broad-leaved and mixed forests of various ecological and coenotic positions-from floodplain and terrace to plateau and ravine-gully ecotopes. According to the soil moisture index, all cluster groups are confined to mesophytic conditions, which corresponds to the formation

on fresh soils with full moistening of the root-containing layer. The highest moisture values are characteristic of floodplain and terrace syntaxa № 8, 9 and 48, while somewhat lower ones are characteristic of the plateau and upper slope groups (№ 16, 19, 28, 45).

The variability of soil moisture reflects the predominance of hydrocontrast-phobic and hemihydrocontrast-phobic conditions, which indicates a relatively uniform water regime in most ecotopes. Soil aeration corresponds to subaerophilic and hemiaerophobic conditions, characteristic of gray and dark gray forest loams. Soil acidity is subacidophilic, which is typical of sod-podzolic and gray forest soils of the Forest-Steppe.

According to the general salt regime, the cluster groups belong mainly to mesotrophic ones. At the same time, increased values of the content of mineral elements are characteristic of individual floodplain and terrace syntaxa (№ 7, 8, 9, 32, 42, 48), which is consistent with their confinement to richer and better moistened substrates. The carbonation of the soils corresponds to hemicarbonatophobic conditions and reflects the formation of communities on weakly carbonated or non-carbonated soils.

Climatic indicators within the cluster are quite homogeneous: the thermal regime corresponds to submicrothermal conditions, the continentality of the climate is of the hemioceanic type, and the cryoregime to subcryophytic conditions. Atmospheric humidification is characterized by subaridophytic values, typical of the Left-Bank Forest-Steppe. The light regime is mainly sciophytic and hemisciophytic, which corresponds to closed or semi-closed stands.

Overall, cluster II represents an ecologically relatively homogeneous group of mesophilic broadleaf forests that form under conditions of moderate moisture, mesotrophic soils, and a stable microclimate, while covering a wide range of ecotopes – from floodplains and terraces to plateaus and ravine-gully systems, which causes internal differentiation without going beyond the mesophilic ecological optimum.

Cluster III includes syntaxa № 1, 2, 4, 29, 37, 38, 40 and 43, united by similar phytoindication characteristics and confinement to well-drained, relatively dry ecotopes of slopes, plateaus and ravine-gully systems. According to the soil moisture index, most of the groups belong to submesophytic conditions, which corresponds to development in relatively dry forest habitats with moderate moisture of the root-containing layer. Syntaxon № 4 (*Rubo caesii-Alnetum*) is distinguished by mesophytic moisture values, however, its inclusion in the cluster is due to its proximity in other soil and climatic indicators.

The variability of moisture reflects hydrocontrastphobic and hemihydro-contrastphobic conditions, which reflects a relatively stable or moderately

uneven water regime, typical of slope and plateau ecotopes. The aeration regime of soils varies from subaerophilic to hemiaerophobic, which is consistent with the distribution of communities on well-aerated gray and dark gray forest soils, as well as on eroded substrates of slopes (№ 1, 2, 29).

Soil acidity within the cluster is relatively homogeneous: the values indicate subacidophilic conditions typical of gray forest soils of the Forest-Steppe. According to the general salt regime, the syntaxa correspond to mesotrophic conditions without signs of salinity. The carbonate regime is characterized by hemicarbonatophobic values, which reflects the formation of communities on weakly carbonated or almost non-carbonated soils. The mineral nitrogen supply is heminitrophilic, without pronounced enrichment.

Climatic indicators within the cluster are consistent: the thermal regime is submicrothermal, the continentality of the climate varies from suboceanic to hemioceanic, the cryo-regime from cryophytic to subcryophytic. Atmospheric humidification corresponds to mesoaridophytic and subaridophytic conditions, which is consistent with the confinement of the groups to elevated and well-drained relief elements. The light regime is sciophytic or hemisciophytic, characteristic of closed and moderately closed stands of oak and mixed forests.

In general, cluster III represents a group of forest syntaxa of drier and warmer habitats of the Left-Bank Forest-Steppe, united by submesophytic moisture conditions, mesotrophic soils, and relatively stable soil and climatic parameters.

Cluster IV includes syntaxa № 12, 31, 33, 34, 35, 36 and 50, confined mainly to floodplain and pine terraces of rivers and leveled interfluvial areas with sandy and sandy loam, mostly podzolized soils. According to the soil moisture index, the cluster groups are formed in conditions from submesophytic to mesophytic. The driest habitats are characteristic of syntaxa № 31 and 35, while № 12, 34 and 50 are confined to somewhat wetter terrace ecotopes. The variability of moisture corresponds to hemihydrocontrastophic conditions and reflects the moderately uneven water regime of well-drained sandy and sandy loam soils. The aeration regime is mainly subaerophilic, which is due to the light granulometric composition of the substrates. The acidity of the soil solution ranges from acidophilic to subacidophilic values, with the maximum values in syntaxa № 33 and 34.

According to the general salt regime, the groups belong to mesotrophic conditions. The carbonate regime is characterized by hemicarbonatophobic values, typical of podzolized sandy and sandy loam soils. The supply of mineral nitrogen varies from subanitrophilic to heminitrophilic conditions, with the lowest values in syntaxon № 35.

Climatic indicators within the cluster are relatively homogeneous: the thermal regime is submicrothermal, atmospheric humidification is subaridophytic, the continentality of the climate is hemioceanic, the cryoregime is subcryophytic. The light regime is predominantly hemisciophytic, which corresponds to oak, oak-pine and pine-oak forests with moderately closed stands.

In general, cluster IV represents a group of terraced and interfluvial forest communities of the Left-Bank Forest-Steppe, formed under conditions of moderate moisture, good drainage and mesotrophic slightly acidic podzolized soils, which is clearly reflected in the agreed phytoindication characteristics of syntaxa № 12, 31, 33, 34, 35, 36 and 50.

CONCLUSIONS

A comprehensive phytoindication analysis of 50 syntaxa of the *Carpino-Fagetea sylvaticae* class of the Left-Bank Forest-Steppe of Ukraine was carried out using hierarchical clustering according to 12 ecological indicators. The results obtained demonstrated a clear ecological differentiation of forest communities and allowed us to generalize their spatial-ecological organization. The allocation of four generalized clusters is statistically justified and reflects the leading gradients of moisture, trophicity and drainage of habitats, while further detailing only clarifies intracluster differences.

Cluster I combines floodplain and ravine-gully communities confined to lowered relief elements with increased moisture, moderate or increased trophicity and limited soil aeration. Cluster II, the most numerous, is represented by mesophilic broad-leaved and mixed forests formed under conditions of moderate moisture and mesotrophic soils and covers a wide range of ecotopes while maintaining similar phytoindication characteristics. Cluster III includes a group of well-drained, relatively drier habitats of slopes and plateaus with submesophytic moisture conditions and stable soil and climatic indicators. Cluster IV represents terraced and interfluvial forests on sandy and sandy loamy, mainly podzolized soils, which are characterized by good drainage, a weakly acidic environment and reduced mineral nitrogen supply. We established that edaphic factors in the intraclass differentiation of groups play a leading role, primarily soil moisture, its acidity and nitrogen content, while climatic indicators within the region remain relatively stable and are of secondary importance. Overall, the results indicate high ecological plasticity of the *Carpino-Fagetea sylvaticae* class, whose groups cover a wide range of ecotopes. The determined ecological amplitudes of syntaxa can be used to predict changes in forest vegetation and scientifically based planning of measures to preserve the biodiversity of the Left-Bank Forest-Steppe of Ukraine.

Studies of this type are of particular importance for the development of an evidence-based approach to the assessment, conservation and management of forest vegetation under conditions of increasing anthropogenic pressure and climate change. The use of phytoindication and multivariate statistical methods makes it possible to identify latent ecological gradients that are not always evident from floristic composition alone, to objectively delimit syntaxa and to assess their ecological similarity and vulnerability. The obtained results form a methodological basis for comparative analyses at the regional and interregional levels, contribute to the improvement of forest typology and syntaxonomic schemes, and can be applied in monitoring programs aimed at detecting early signs of ecological shifts and degradation processes in nemoral forest ecosystems.

SUMMARY

The paper presents the results of a comprehensive phytoindication analysis of 50 syntaxa of the *Carpino-Fagetea sylvaticae* class of the Left-Bank Forest-Steppe of Ukraine. The aim of the study was to identify patterns of ecological differentiation of forest communities in the region. Hierarchical clustering methods (Ward's method) based on 12 ecological scales of Ya.P. Didukh were applied. It was established that the leading factors of differentiation are soil moisture and trophicity (nitrogen content, acidity), while climatic indicators are relatively stable. Four generalized ecological clusters of syntaxa are distinguished: hygro-mesophytic floodplain and lowland forests; mesophilic forests of a wide ecotopic spectrum; submesophytic groups of slopes and plateaus; submesophytic forests of pine terraces on sandy soils. The results obtained demonstrate significant ecological plasticity of the *Carpino-Fagetea* class and provide a basis for predicting vegetation changes under anthropogenic load.

Bibliography

1. Фельбаба-Клушина Л. М. Продромус рослинності України : монографія. Київ : Наук. думка, 2019. 782 с.
2. Гончаренко І. В. Аналіз рослинного покриву північно-східного Лісостепу України. *Укр. фітоценол. зб. Сер. А.* 2003. Вип. 1 (19). С. 1–203.
3. Оптимізація екологічних функцій, територіального розподілу, використання та охорони полезахисних лісових смуг агросфери України (стан, структура, репрезентативність, фітострома) : метод. рек. / В. В. Коніщук та ін. Київ : Agroecology and Environmental Management NAAN, 2024. 82 с. DOI: https://doi.org/10.33730/978-617-7785-61-2

4. Дідух Я. П., Плюта П. Г. Фітоіндикація екологічних факторів. Київ : Наук. думка, 1994. 280 с.

5. Дідух Я. П. Методологічні підходи до проблем фітоіндикації екологічних факторів. *Укр. ботан. журн.* 1990. Т. 47, № 6. С. 5–12.

6. Дідух Я. П., Ємшанов Д. Г., Школьніков Ю. А. Використання фітоіндикаційних оцінок при вивченні структури лісових екосистем. *Укр. ботан. журн.* 1997. Т. 54, № 1. С. 47–56.

7. Вакал А. П., Дідух Я. П. Фітоіндикаційна характеристика природних умов околиць міста Суми. *Укр. ботан. журн.* 1991. Т. 48, № 5. С. 57–61.

8. Гончаренко І. В. Рослинність заказника «Підліснівський» (Сумська область) та її фітоіндикаційний аналіз. *Укр. фітоценол. зб. Сер. С : Фітоекологія.* 2003. Вип. 1 (20). С. 98–102.

9. Голик Г. М., Гончаренко І. В. Синтаксономія деревної рослинності м. Києва, її синфітоіндикаційний аналіз та антропогенна трансформація. *Екологія та ноосферологія.* 2017. Т. 28, № 1–2. С. 49–63.

10. Goncharenko I. V., Solomakha I. V., Shevchyk V. L. et al. A phytoindicational assessment of the vegetation of afforestation belts in the Middle Dnipro Region, Ukraine. *Environmental & Socio-economic Studies*. 2022. Vol. 10 (2). P. 30–39. DOI: https://doi.org/10.2478/environ-2022-0009

11. Бондарук М. А., Целіщев О. Г. Фітоіндикація едафічних режимів екотопів лісових екосистем Лівобережно-Дніпровського лісостепового округу України. *Лісівництво і агролісомеліорація*. 2018. Вип. 132. С. 94–104. DOI: https://doi.org/10.33220/1026-3365.132.2018.94

12. Національний атлас України / редкол.: Л. Г. Руденко (голова) та ін. Київ : ДНВП «Картографія», 2007. 440 с.

13. Іваненко Є. І. Комплексне природне районування України: історико-картографічний огляд. *Фізична географія та геоморфологія*. 2015. Вип. 1 (77). С. 12–22.

14. Географічна енциклопедія України : у 3 т. / редкол.: О. М. Маринич (відп. ред.) та ін. Київ : УРЕ ім. М. П. Бажана, 1993. Т. 3 : П–Я. 480 с.

15. Геоботанічне районування Української РСР / Г. І. Білик, Є. М. Брадіс, М. А. Голубець та ін. Київ : Наук. думка, 1977. 304 с.

16. Географічна енциклопедія України : у 3 т. / редкол.: О. М. Маринич (відп. ред.) та ін. Київ : УРЕ ім. М. П. Бажана, 1990. Т. 2 : З–О. 480 с.

17. Крупский Н. К., Полупан Н. И. Атлас почв Украинской ССР. Киев : Урожай, 1979. 160 с.

18. Географічна енциклопедія України : у 3 т. / редкол.: О. М. Маринич (відп. ред.) та ін. Київ : УРЕ ім. М. П. Бажана, 1989. Т. 1 : А–Ж. 416 с.

19. Байрак О. М. Синтаксономія широколистяних лісів Лівобережного Придніпров'я. *Укр. фітоценол. зб. Сер. А.* 1996. Вип. 3 (3). С. 51–63.

20. Байрак О. М. Фітоценотична характеристика заплавних лісів Лівобережного Придніпров'я. *Укр. фітоценол. зб. Сер. А.* 1997. Вип. 1 (6). С. 45–51.

21. Соломаха І. В., Сенчило О. О., Колот О. М., Войтюк Б. Ю. Лісова рослинність Чорнухівщини (Полтавська область). *Укр. фітоценол. зб. Сер. А.* 1997. Вип. 2 (7). С. 80–88.

22. Шевчик В. Л., Полішко О. Д. Синтаксономія рослинності ділянки борової тераси (Ліплявське лісництво Черкаської області). *Укр. фітоценол. зб. Сер. А.* 2000. Вип. 16 (1). С. 67–89.

23. Гончаренко І. В. Флористична класифікація лісів лісостепової Сумщини. *Укр. фітоценол. зб. Сер. А.* 2001. Вип. 1 (17). С. 3–17.

24. Воробйов Є. О. Попередній продромус суходольних лісів та рідколісь природного та штучного походження з переважанням або помітною участю *Pinus sylvestris* L. s.l. рівнинної частини України. *Рослинність хвойних лісів України*. Київ : Фітосоціоцентр, 2003. С. 13–42.

25. Гомля Л. М. Рослинність долини річки Хорол. *Укр. фітоценол. зб.* Київ, 2005. С. 3–186.

26. Onyshchenko V. A. Forests of order *Fagetalia sylvaticae* in Ukraine. Kyiv : Alterpress, 2009. 212 p. ISBN 978-966-542-417-8

27. Давидов Д. А. Лісова рослинність Роменсько-Полтавського геоботанічного округу (Україна): синтаксономія, антропогенні зміни та охорона : дис. … канд. біол. наук : 03.00.05 / Ін-т ботаніки ім. М. Г. Холодного НАН України. Київ, 2012. 408 с.

28. Смаглюк О. Ю., Соломаха В. А. Флористична класифікація мезофільних широколистяних лісів союзу *Carpinion betuli* Issl. em. Oberd. 1953 у басейні нижньої течії річки Сули. *Вісник Черкаського університету. Сер.: Біологічні науки*. 2015. № 19. С. 98–109.

29. Solomakha V., Smoliar N., Smagliuk O. Floristic classification of the floodplain alder, willow and poplar forests in the basin of the lower Sula (Ukraine). *Вісник Київського національного університету імені Тараса Шевченка. Сер.: Біологія*. 2016. Вип. 2. С. 33–44.

30. Смаглюк О. Ю., Смоляр Н. М., Соломаха В. А. Флористична класифікація мезофільних кленово-липово-дубових лісів у басейні нижньої Сули (Україна). *Вісник Львівського університету. Сер.: Біологічна*. 2017. Вип. 75. С. 23–34.

31. Didukh Y. P. The ecological scales for the species of Ukrainian flora and their use in synphytoindication. Kyiv : Phytosociocentre, 2011. 176 p.

Information about the authors:
Kalinskyi Pavlo Volodymyrovych,
Postgraduate Student (2nd year)
at the Department of Environmental Monitoring,
Institute for Evolutionary Ecology
of the National Academy of Sciences of Ukraine
37, Lebedeva street, Kyiv, 03143, Ukraine

Goncharenko Ihor Viktorovych,
Doctor of Biological Sciences, Professor,
Head of the Department of Environmental Monitoring,
Institute for Evolutionary Ecology
of the National Academy of Sciences of Ukraine
37, Lebedeva street, Kyiv, 03143, Ukraine;
Department of Medical Biology and Sports Dietetics,
National University of Ukraine on Physical Education and Sport
Kyiv, Ukraine
Department of Landscape Protection, Biodiversity Conservation
and Nature Preservation, Institute of Agroecology and Environmental
Management of NAAS, Kyiv, Ukraine

Drebot Oksana Ivanivna,
Doctor of Economic Sciences, Professor, Academician of NAAS,
Institute of Agroecology and Environmental Management of the National
Academy of Agrarian Sciences of Ukraine
12, Metrologichna street, Kyiv, 03143, Ukraine

CHAPTER 7

ЕКОЛОГІЧНІ АСПЕКТИ УПРАВЛІННЯ ТЕРИТОРІАЛЬНИМИ ГРОМАДАМИ У СИСТЕМІ ЗБЕРЕЖЕННЯ ТА ВІДНОВЛЕННЯ ПРИРОДНИХ ЕКОСИСТЕМ

Квасній З. В., Сеньків В. М., Даниленко Ю. В.
DOI https://doi.org/10.30525/978-9934-26-654-6-7

ВСТУП

В умовах зростаючого антропогенного навантаження особливого значення набуває роль територіальних громад як ключових суб'єктів управління природними ресурсами на місцевому рівні. Саме в межах громад реалізується значна частина практичних заходів із збереження та відновлення природних екосистем, зокрема управління земельними, водними та лісовими ресурсами, просторове планування та організація природоохоронної діяльності. Ефективність наукових стратегій у цій сфері значною мірою залежить від інтеграції екологічних принципів у систему місцевого самоврядування та прийняття управлінських рішень з урахуванням екосистемного підходу.

Управління територіальними громадами на засадах екологічної сталості передбачає впровадження комплексних механізмів планування розвитку територій, які враховують екологічну ємність ландшафтів, рівень антропогенного навантаження та потенціал природних екосистем до самовідновлення. Застосування науково обґрунтованих інструментів екологічного моніторингу, геоінформаційних систем і оцінки екосистемних послуг дозволяє громадам ідентифікувати екологічні ризики, визначати пріоритетні напрями відновлення деградованих територій та підвищувати ефективність використання природних ресурсів. У цьому контексті важливим є розвиток міжмуніципального співробітництва з метою збереження екологічних коридорів і цілісності природних екосистем, що виходять за адміністративні межі окремих громад.

Наукові стратегії збереження та відновлення екосистем у системі управління територіальними громадами мають бути узгоджені з державними та регіональними програмами екологічної політики,

а також із цілями сталого розвитку. Особливої актуальності це набуває в умовах післявоєнного відновлення територій, коли громади відіграють провідну роль у реабілітації деградованих земель, відновленні водних об'єктів і формуванні локальних елементів національної екологічної мережі. Таким чином, поєднання екологічних засад і ефективного управління територіальними громадами створює передумови для реалізації науково обґрунтованих стратегій збереження та відновлення природних екосистем та забезпечення екологічної безпеки на місцевому рівні.

1. Роль екологічних засад у формуванні стратегій управління природними ресурсами територіальних громад

В умовах зростаючого антропогенного навантаження екологічні засади стають визначальним елементом формування стратегій управління природними ресурсами на рівні територіальних громад. Децентралізація управління та розширення повноважень органів місцевого самоврядування зумовлюють необхідність переосмислення підходів до використання, охорони та відновлення природних екосистем у межах громад. Саме на локальному рівні відбувається безпосередня взаємодія між господарською діяльністю людини та природним середовищем, що робить громади ключовими суб'єктами реалізації екологічної політики та науково обґрунтованих стратегій сталого розвитку.

Екологічні засади управління територіями передбачають застосування екосистемного підходу, який орієнтується на збереження цілісності природних систем, підтримання біорізноманіття та забезпечення відтворюваності екосистемних послуг. У контексті діяльності територіальних громад це означає необхідність врахування екологічної ємності територій, допустимих меж антропогенного навантаження та просторової взаємопов'язаності природних компонентів під час прийняття управлінських рішень. Такий підхід дозволяє мінімізувати екологічні ризики, запобігати деградації земель, водних і лісових ресурсів та створювати передумови для довгострокової екологічної стійкості територій.

Важливою складовою формування наукових стратегій управління природними ресурсами громад є використання результатів екологічного моніторингу та наукових досліджень. Систематичне оцінювання стану довкілля, виявлення осередків деградації та прогнозування екологічних змін дають змогу громадам обґрунтовувати пріоритети розвитку та планувати відновлювальні заходи з урахуванням природних особливостей територій. Систематичне оцінювання стану довкілля,

виявлення осередків деградації та прогнозування екологічних змін дають змогу громадам обґрунтовувати пріоритети розвитку та планувати відновлювальні заходи з урахуванням природних особливостей територій. Це передбачає використання даних екологічного моніторингу, геоінформаційних систем, природоохоронних індикаторів та регулярних оцінок стану водних, земельних і лісових ресурсів для формування заходів з рекультивації еродованих земель, очищення водних об'єктів і відновлення природних ландшафтів. Наприклад, у низці громад, що зазнали руйнувань унаслідок воєнних дій, впроваджуються програми відновлення зелених зон та рекультивації деградованих ділянок – на основі методичних рекомендацій, затверджених Кабінетом Міністрів України щодо післявоєнного відновлення (зокрема на основі Національного плану відновлення України). Такі програми включають відновлення прилеглих до населених пунктів лісових масивів, очищення річок і відновлення природного гідрологічного режиму, що сприяє стабілізації екосистем і зменшенню ризику ерозії ґрунтів.

Інтеграція екологічних показників у стратегічні та просторові плани розвитку громад сприяє узгодженню природоохоронних заходів із соціально-економічними потребами місцевого населення. Зокрема, План управління ризиками та відновлення після кризових ситуацій для окремих територіальних громад передбачає включення екологічних цілей у місцеві стратегії розвитку, що відповідає вимогам Закону України «Про стратегічну екологічну оцінку»[1] та положенням Директиви ЄС щодо оцінки впливу на довкілля. Важливо зазначити, що використання міжнародних програм, таких як Десятиліття ООН з відновлення екосистем (UN Decade on Ecosystem Restoration 2021–2030) та Європейський зелений курс (European Green Deal), дозволяє громадам залучати грантову і технічну підтримку для реалізації природоорієнтованих проектів. Наприклад, у рамках ініціатив ЄС щодо відновлення біорізноманіття місцеві ініціативи можуть отримувати фінансування на рекультивацію деградованих земель, створення екологічних коридорів та відновлення природних водно-болотних угідь.

Залучення цих міжнародних джерел партнерства сприяє не лише технологічному оновленню, але й підвищує інституційну спроможність органів місцевого самоврядування, оскільки вони отримують доступ до передового досвіду екологічного менеджменту. Водночас активне залучення місцевих громад до процесів прийняття рішень сприяє

[1] Закон України «Про стратегічну екологічну оцінку» від 20.03.2018 р. https://zakon.rada.gov.ua/go/2354-19

формуванню екологічної культури й відповідального ставлення до природних ресурсів, що є важливим елементом сталого розвитку та післявоєнної реабілітації територій.

Такий підхід дозволяє поєднати управлінські, екологічні та соціальні аспекти розвитку громад, забезпечуючи комплексне відновлення інфраструктури та природних систем. Включення мешканців у планування та реалізацію відновлювальних проєктів сприяє не лише більш точному врахуванню місцевих потреб, а й підвищенню ефективності використання ресурсів, зменшенню конфліктів щодо землекористування та охорони довкілля. Крім того, інтеграція громадянських ініціатив у процеси рекультивації земель, відновлення водних об'єктів і зелених зон створює передумови для формування локальних екологічних мереж, покращення якості життя та довгострокової стійкості територій. В умовах післявоєнної відбудови це особливо важливо, оскільки дозволяє швидко реагувати на наслідки руйнівних дій, адаптувати стратегії управління до змін клімату та антропогенного тиску, а також забезпечує взаємодію з національними та міжнародними програмами підтримки сталого розвитку. Інтегрована модель управління територіальними громадами поєднує моніторинг довкілля, нормативно-правову підтримку та міжнародну співпрацю, створює умови для ефективного відновлення екосистем і підвищення екологічної безпеки на локальному рівні.

Таблиця 1

Основні підходи до екологічно орієнтованого відновлення територіальних громад України

Напрям відновлення	**Конкретні заходи**	**Нормативна база / стратегічні документи**	**Міжнародна підтримка**	**Очікуваний ефект**
1	2	3	4	5
Відновлення земель	Рекультивація деградованих земель, боротьба з ерозією, консервація сільгоспугідь	Закон України «Про охорону земель», Національний план відновлення України	Десятиліття ООН з відновлення екосистем, гранти UNDP	Відновлення родючості ґрунтів, зменшення деградації територій
Водні об'єкти	Очистка річок, відновлення водно-болотних угідь, відновлення гідрологічного режиму	Закон України «Про водні ресурси», Стратегія екологічної безпеки	EU Biodiversity Strategy, UNDP Water Programme	Поліпшення якості води, відновлення біорізноманіття, зменшення ризику повеней

Продовження таблиці 1

1	2	3	4	5
Лісові та зелені зони	Висадка лісів, створення зелених коридорів, реабілітація парків і лісопосадок	Закон України «Про ліси», Закон «Про природно-заповідний фонд»	European Green Deal, Bonn Challenge	Відновлення екосистем, покращення мікроклімату, рекреаційні зони для громад
Інфраструктура	Енергоефективне будівництво, реконструкція медичних і соціальних закладів з урахуванням екології	Закон України «Про стратегічну екологічну оцінку», будівельні норми	European Green Deal, фінансування ЄІБ	Зменшення негативного впливу на довкілля, підвищення енергоефективності
Інституційне управління	Моніторинг довкілля, інтеграція екологічних показників у стратегії громад, навчання персоналу	Закон України «Про місцеве самоврядування», Стратегія екологічної безпеки	UNDP, OECD, гранти ЄС	Підвищення ефективності управління ресурсами, формування екологічної культури
Соціальна складова	Залучення громадськості до планування, екологічна освіта, консультації з місцевими мешканцями	Закон України «Про стратегічну екологічну оцінку», локальні програми	UNDP, UNESCO	Підвищення обізнаності населення, формування відповідального ставлення до довкілля

Джерело: сформовано авторами на основі аналізу наукових джерел

Таким чином, інтеграція екологічних засад у систему управління територіальними громадами формує наукову основу для реалізації стратегій збереження та відновлення природних екосистем і сприяє досягненню цілей сталого розвитку на місцевому рівні.

2. Механізми інтеграції екологічних стратегій у систему управління територіальними громадами

Реалізація наукових стратегій збереження та відновлення природних екосистем на рівні територіальних громад потребує впровадження ефективних управлінських механізмів, що забезпечують інтеграцію екологічних пріоритетів у процеси місцевого розвитку. Така інтеграція має здійснюватися через систему стратегічного та просторового планування, програм соціально-економічного розвитку громад і механізми бюджетного управління. Включення екологічних цілей до стратегічних документів громад дозволяє узгодити господарську

діяльність із природоохоронними завданнями та мінімізувати негативний вплив антропогенного навантаження на локальні екосистеми.

Важливим інструментом екологічно орієнтованого управління громадами є впровадження систем екологічного моніторингу та використання геоінформаційних технологій. Вони забезпечують просторову ідентифікацію екологічних проблем, оцінку стану земельних, водних і лісових ресурсів, а також визначення пріоритетних зон для відновлення та охорони. На основі таких даних органи місцевого самоврядування можуть приймати науково обґрунтовані рішення щодо рекультивації деградованих територій, збереження біорізноманіття та формування локальних елементів екологічної мережі.

Не менш важливою є роль інституційних та фінансово-економічних механізмів у реалізації екологічних стратегій територіальних громад. Залучення інвестицій у природоорієнтовані проєкти, використання інструментів державно-приватного партнерства, грантових програм і міжмуніципального співробітництва створює додаткові можливості для масштабування екологічних ініціатив.

Водночас підвищення екологічної компетентності органів місцевого самоврядування та залучення громадськості до процесів ухвалення рішень сприяють формуванню відповідального ставлення до природних ресурсів і підвищенню ефективності управління природними екосистемами на місцевому рівні. Це дозволяє громадам оперативно реагувати на екологічні виклики, планувати відновлювальні та рекультиваційні заходи з урахуванням місцевих особливостей та пріоритетів, а також ефективно інтегрувати природоохоронні цілі у стратегії соціально-економічного розвитку. Активна участь місцевих мешканців у процесах ухвалення рішень сприяє підвищенню прозорості та підзвітності органів влади, зміцнює інституційну спроможність громад та формує культуру сталого використання ресурсів. Крім того, поєднання місцевих ініціатив із національними програмами відновлення та міжнародними екологічними стратегіями, такими як Десятиліття ООН з відновлення екосистем і Європейський зелений курс, створює передумови для комплексного та ефективного відновлення природних екосистем у післявоєнний період.

Водночас активне залучення місцевих громад до процесів ухвалення рішень сприяє формуванню відповідального ставлення до природних ресурсів і підвищенню ефективності управління природними екосистемами на місцевому рівні. Це підтверджують практичні приклади з різних регіонів України, де громади беруть участь у реалізації проєктів зеленого післявоєнного відновлення, що поєднують екологічний,

соціальний і економічний виміри. Так, у Краснокутській громаді на Харківщині реалізовано ініціативу зі створення біорізноманітних просторів із різноманітними травами, що не лише сприяє відновленню природних ландшафтів, а й підтримує кліматичну стійкість та освіту місцевих жителів про взаємозв'язок людини і природи. Аналогічно, проєкти «Зелена відбудова» передбачають оцінювання екологічної шкоди, очищення ґрунтів і води, а також впровадження екологічно безпечних технологій, що реалізуються спільно з українськими та міжнародними експертами для приблизно 90 громад по всій країні. Такі практики демонструють, що інтеграція екологічних показників у місцеві стратегії розвитку не лише підвищує екологічну безпеку, а й стає основою для залучення додаткових ресурсів та міжнародної підтримки в процесах післявоєнного відновлення.

3. Екологічні пріоритети управління територіальними громадами України в умовах війни та післявоєнного відновлення

Воєнні дії на території України суттєво загострили екологічні проблеми на локальному рівні та посилили роль територіальних громад у процесах збереження й відновлення природних екосистем. Руйнування ландшафтів, деградація земель, забруднення ґрунтів і водних об'єктів, порушення лісових та степових екосистем створили безпрецедентні виклики для системи місцевого управління. За таких умов громади виступають ключовими суб'єктами реалізації екологічних заходів, оскільки саме на їхньому рівні відбувається першочергова оцінка екологічних збитків та формування практичних рішень щодо реабілітації постраждалих територій.

У післявоєнний період управління територіальними громадами України має ґрунтуватися на інтеграції екологічних пріоритетів у стратегії відновлення та розвитку. Така інтеграція потребує посилення нормативно-правової бази, зокрема дотримання положень Конституції України[2] та ряду законів у сфері охорони довкілля, таких як Закон України «Про охорону навколишнього природного середовища»[3], «Про охорону земель»[4], «Про екологічну мережу України»[5] та «Про

[2] КонституціяУкраїни. https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/254к/96-вр#Text

[3] Закон України «Про охорону навколишнього природного середовища». https://zakon.rada.gov.ua/go/1264-12

[4] Закон України «Про охорону земель» від 19.06.2023. https://ips.ligazakon.net/document/T030962

[5] Закон України «Про екологічну мережу України» від 24.06.2004. https://online.budstandart.com/ua/catalog/doc-page.html?id_doc=46311

стратегічну екологічну оцінку»[6], що визначають правові засади охорони та раціонального використання природних ресурсів на місцевому рівні.

Крім того, нові ініціативи державної політики спрямовані на забезпечення післявоєнного відновлення територій із урахуванням екологічних вимог. Наприклад, створення Національної ради з відновлення України від наслідків війни передбачає участь експертів і науковців у сфері екологічної безпеки та внесення пропозицій щодо захисту довкілля у відновлювальні програми.

Наукові дослідження показують, що «Усвідомлюючи критичну необхідність зупинити, запобігти та звернути назад деградацію екосистем, а також ефективно відновити деградовані наземні, прісноводні та морські екосистеми по всьому світу, Генеральна Асамблея Організації Об'єднаних Націй у Резолюції 73/284 оголосила 2021–2030 роки Десятиліттям Організації Об'єднаних Націй з відновлення екосистем»[7].

На міжнародному рівні наукові стратегії відновлення екосистем можуть спиратися на рамкові документи, такі як UN Decade on Ecosystem Restoration 2021–2030[8], ініційована ООН, яка пропонує комплексні підходи до відновлення деградованих екосистем і сприяння їх стійкості на довгострокову перспективу[9]. Реалізація принципів згідно цього документу в Україні передбачає використання природоорієнтованих рішень, відновлення функціональності ландшафтів, а також залучення громад до поширення практик відновлення.

Залучення міжнародних організацій, іноземних інвесторів і наукової спільноти сприяє впровадженню інноваційних екологічних підходів, підвищенню інституційної спроможності органів місцевого самоврядування та забезпеченню фінансової підтримки екологічних проєктів. Таким чином, екологічно орієнтоване управління територіальними громадами України в умовах війни та післявоєнного відновлення є необхідною передумовою збереження природного потенціалу, підвищення якості життя населення та досягнення цілей сталого розвитку держави.

---

[6] Закон України «Про стратегічну екологічну оцінку» від 04.10.2016. https://ips.ligazakon.net/document/JH2IJ00G

[7] Принципи відновлення екосистем, якими слід керуватися в рамках Десятиліття Організації Об'єднаних Націй 2021–2030 років. https://www.decadeonrestoration.org/publications/principles-ecosystem-restoration-guide-united-nations-decade-2021-2030

[8] UN Decade on Ecosystem Restoration 2021–2030 https://www.decadeonrestoration.org/

[9] UNEP – UN Environment Programme. https://www.unep.org/explore-topics/ecosystems-and-biodiversity/what-we-do/decade-ecosystem-restoration?utm_source=chatgpt.com

Важливим методологічним орієнтиром для післявоєнного екологічного відновлення територіальних громад України є імплементація положень міжнародних стратегій і програм відновлення екосистем. Зокрема, значний практичний потенціал має Десятиліття ООН з відновлення екосистем (UN Decade on Ecosystem Restoration 2021–2030)[10], яке спрямоване на масштабування природоорієнтованих рішень, відновлення деградованих земель, водних і лісових екосистем, а також залучення місцевих громад до екологічного управління. В цьому документі зазначено, що «Тільки завдяки здоровим екосистемам ми можемо покращити життя, протидіяти змінам клімату та зупинити крах біорізноманіття». В умовах України ця ініціатива є особливо актуальною з огляду на масштабні воєнні пошкодження природного середовища.

Крім того, у контексті післявоєнного відновлення доцільним є врахування принципів Європейського зеленого курсу (European Green Deal), зокрема в частині кліматичної нейтральності, збереження біорізноманіття та сталого землекористування. Для територіальних громад це означає необхідність інтеграції екологічних цілей у місцеві стратегії розвитку, просторове планування та інфраструктурні проєкти. Важливу роль також відіграє Стратегія ЄС з біорізноманіття до 2030 року (EU Biodiversity Strategy for 2030)[11], яка передбачає відновлення деградованих екосистем і розширення природоохоронних територій, що може бути адаптовано до українських реалій. Стратегічний документ визначає чіткі зобов'язання та комплекс практичних заходів, реалізація яких на території Європейського Союзу запланована до 2030 року. До найбільш амбітних цілей, досягнення яких передбачається в середньостроковій перспективі, належать розширення мережі природоохоронних територій до щонайменше 30 % площі суходолу та 30 % морських акваторій, а також активізація розвитку сталого й органічного сільського господарства. Важливим пріоритетом є скорочення використання небезпечних пестицидів на 50 %, що має сприяти зменшенню антропогенного тиску на екосистеми та збереженню популяцій запилювачів. Документ також передбачає істотне обмеження вилучення з природного середовища промислових видів, чисельність яких перебуває у стані скорочення, а також відновлення щонайменше 25 тис. км річок до природного вільноплинного стану з метою збереження екосистем прісноводних водойм.

[10] Десятиліття ООН з відновлення екосистем. https://forest.gov.ua/news/vsesvitnij-den-ohoroni-navkolishnogo-seredovishcha-pochatok-desyatilittya-oon-iz-vidnovlennya-ekosistem

[11] Стратегія біорізноманіття ЄС до 2030 року: повернення природи в наше життя. https://uncg.org.ua/stratehiia-bioriznomanittia-ies-do-2030-roku-povernennia-pryrody-v-nashe-zhyttia/

Глобальні кліматичні зміни, які стали одним із ключових чинників формування цієї природоохоронної стратегії ЄС, мають транснаціональний характер і не обмежуються лише розвиненими західноєвропейськими країнами. Найбільш відчутний негативний вплив глобального потепління на стан довкілля та економічну стабільність зазнають менш розвинені, насамперед аграрно орієнтовані держави. У європейському контексті до таких країн належить Україна, де рівень розораності територій сягає близько 54 %, що є одним із найвищих показників не лише в Європі, а й у світовому масштабі.

На національному рівні екологічні пріоритети діяльності територіальних громад у післявоєнний період мають реалізовуватися відповідно до Стратегії екологічної безпеки та адаптації до зміни клімату України[12], Стратегії державної екологічної політики України на період до 2030 року[13], а також положень Національного плану відновлення України[14], в якому екологічний компонент визначено одним із наскрізних напрямів відбудови. Перші системні ініціативи з відновлення України були започатковані у 2020 році, що знайшло відображення у підписанні фінансової угоди між Україною та Європейським інвестиційним банком. Одним із ключових напрямів реалізації цієї програми стало відновлення інфраструктури, за координацію якого відповідає Міністерство розвитку громад, територій та інфраструктури України. Фінансування затвердженого переліку проєктів здійснюється шляхом надання субвенцій з державного бюджету місцевим бюджетам, тоді як контроль за їх виконанням покладено на відповідний центральний орган виконавчої влади. Програма орієнтована не лише на відбудову об'єктів критичної інфраструктури, але й на реконструкцію та капітальний ремонт закладів соціальної сфери, зокрема медичних установ.

Водночас повномасштабна військова агресія проти України та масштабні руйнування, яких держава зазнала у 2022 році, зумовили необхідність розроблення оновленого плану відновлення й активного залучення додаткових фінансових ресурсів та міжнародної підтримки. У сучасних умовах актуалізується завдання узгодження попередніх і нових програм відбудови з метою запобігання дублюванню заходів

[12] Стратегія екологічної безпеки та адаптації до зміни клімату України. https://mepr.gov.ua/wp-content/uploads/2022/08/NatsionalnaPolitykaAdaptatsiyiDoZK_mozhlyvostiTaNapryamyRoboty.pdf

[13] Стратегія державної екологічної політики України на період до 2030 року. https://ips.ligazakon.net/document/T192697

[14] Національний план відновлення України. https://ua.urc-international.com/plan-vidnovlennya-ukrayini

та підвищення ефективності використання ресурсів. Окремої уваги потребує інтеграція планів післявоєнного відновлення з довоєнними національними стратегіями, міжнародними зобов'язаннями України у сфері прав людини, а також із процесом європейської інтеграції та виконанням відповідних зобов'язань на шляху до членства в Європейському Союзі.

Таблиця 2

Міжнародні стратегії екологічного відновлення та можливості їх застосування в територіальних громадах України

Міжнародна стратегія / ініціатива	Ключові цілі та пріоритети	Інструменти реалізації	Можливості адаптації для територіальних громад України
Десятиліття ООН з відновлення екосистем	Відновлення деградованих екосистем; підвищення стійкості природних систем;	Природоорієнтовані рішення, екосистемне планування, участь місцевих спільнот	Реабілітація земель, відновлення лісів і водних об'єктів; залучення громад до проєктів екологічного відновлення
Європейський зелений курс (European Green Deal)	Кліматична нейтральність; сталий розвиток територій; збереження природного капіталу	Екологізація економіки, зелена інфраструктура, декарбонізація	Інтеграція екологічних цілей у стратегії розвитку громад; відбудова інфраструктури за «зеленими» стандартами
Стратегія ЄС з біорізноманіття до 2030 року	Зупинення втрат біорізноманіття; відновлення екосистем	Розширення природоохоронних територій, екологічні коридори	Формування локальних екомереж; відновлення природних ландшафтів у межах громад
Програми Світового банку з екологічного відновлення	Поєднання екологічного та економічного відновлення	Фінансування, технічна допомога, інституційна підтримка	Реалізація проєктів рекультивації та сталого землекористування з міжнародною фінансовою підтримкою
Підходи UNEP та UNDP до післякризового відновлення	Відновлення довкілля в умовах конфліктів; підвищення екологічної безпеки	Оцінка екологічних збитків, планування відновлення	Проведення екологічної оцінки воєнних втрат; розробка місцевих планів екологічної реабілітації
OECD: сталий територіальний розвиток	Баланс економічного розвитку та охорони довкілля	Інтегроване територіальне управління, рекомендації	Підвищення управлінської спроможності громад у сфері екологічно

Джерело: узагальнено автором на основі міжнародних стратегічних документів

Водночас у процесі післявоєнного відновлення територіальних громад екологічна складова має набути статусу одного з базових пріоритетів державної політики. Відбудова зруйнованої інфраструктури повинна здійснюватися з урахуванням принципів сталого розвитку, екологічної безпеки та адаптації до зміни клімату. Це передбачає впровадження енергоефективних і ресурсозберігаючих технологій, використання екологічно безпечних будівельних матеріалів, а також мінімізацію негативного впливу відновлювальних робіт на довкілля на локальному рівні.

Особливого значення набуває інтеграція екосистемного підходу в стратегії розвитку громад, зокрема під час просторового планування, реконструкції житлових і промислових зон, відновлення транспортної та інженерної інфраструктури. Реалізація природоорієнтованих рішень таких як відновлення зелених зон, рекультивація деградованих земель, реабілітація водних об'єктів і створення екологічних коридорів – сприятиме підвищенню стійкості територій до антропогенних і кліматичних ризиків, а також покращенню якості життя населення.

Крім того, екологічно орієнтована відбудова громад створює передумови для залучення міжнародного фінансування та інвестицій, оскільки відповідає пріоритетам Європейського зеленого курсу, Стратегії ЄС з біорізноманіття до 2030 року та Десятиліття ООН з відновлення екосистем. Таким чином, поєднання інфраструктурної реконструкції з відновленням природних екосистем дозволяє сформувати комплексну модель післявоєнного розвитку територіальних громад України, орієнтовану на довгострокову екологічну та соціально-економічну стійкість.

Таким чином, поєднання міжнародних екологічних стратегій із національними програмами післявоєнного відновлення створює передумови для формування в Україні моделі сталого розвитку територіальних громад, орієнтованої на відновлення екосистем, підвищення екологічної безпеки та довгострокову стійкість соціально-економічного розвитку.

ВИСНОВКИ

У ході дослідження було встановлено, що сучасні антропогенні фактори, зокрема інтенсивне землекористування, промислова діяльність, урбанізація та воєнні дії, суттєво впливають на стан природних екосистем в Україні та світі, спричиняючи деградацію земель, забруднення водних ресурсів, втрату біорізноманіття та порушення екологічної рівноваги. Аналіз наукових підходів до збереження та відновлення екосистем дозволив виокремити комплекс стратегічних напрямів, що поєднують

соціо-екологічний, економічний, правовий і природоорієнтований аспекти. Важливою передумовою ефективності таких стратегій є інтеграція наукових знань у систему управління територіальними громадами та державну екологічну політику, що забезпечує узгодженість екологічних, соціально-економічних і просторових пріоритетів розвитку.

Особливого значення набуває роль територіальних громад як ключових суб'єктів реалізації природоохоронних заходів, оскільки на локальному рівні відбувається оцінка екологічних ризиків, планування заходів відновлення та управління природними ресурсами. Інтеграція екологічних засад у процеси стратегічного та просторового планування дозволяє громадам ефективно управляти земельними, водними та лісовими ресурсами, формувати локальні елементи національної екологічної мережі та підвищувати стійкість територій до антропогенних і кліматичних навантажень.

Проведений аналіз українських умов показав, що масштабні руйнації внаслідок воєнної агресії створили критичні виклики для збереження природного потенціалу країни. Післявоєнне відновлення територіальних громад потребує комплексного підходу, що передбачає рекультивацію деградованих земель, відновлення водних об'єктів і лісових масивів, а також інтеграцію принципів сталого розвитку та природоорієнтованих технологій у будівництво та реконструкцію інфраструктури. Синхронізація національних програм відновлення з міжнародними ініціативами: Десятиліттям ООН з відновлення екосистем, Європейським зеленим курсом та стратегіями збереження біорізноманіття – створює передумови для залучення ресурсів та підвищення ефективності природоохоронних заходів.

Науково обґрунтовані стратегії відновлення природних екосистем в Україні мають забезпечити гармонізацію між екологічними пріоритетами, правами людини та економічними потребами місцевих громад, а також стати основою для розвитку інноваційних моделей управління природними ресурсами. Впровадження комплексних підходів до збереження екосистем, їх відновлення та інтеграції у процеси територіального управління сприятиме формуванню сталих, екологічно безпечних і соціально відповідальних громад, здатних протидіяти сучасним та майбутнім викликам антропогенного тиску.

Таким чином, результати дослідження підтверджують, що наукові стратегії збереження та відновлення природних екосистем є не лише необхідною умовою екологічної безпеки України, а й ключовим чинником забезпечення сталого розвитку територіальних громад у післявоєнний період.

АНОТАЦІЯ

Дослідження проведено на основі аналізу сучасних наукових підходів до збереження та відновлення природних екосистем в умовах зростаючого антропогенного навантаження. Розглянуто основні фактори деградації довкілля, включаючи інтенсивне землекористування, урбанізацію, промислову діяльність та наслідки воєнних конфліктів. Проаналізовано науково-екологічні підходи, що поєднують соціо-екологічні, економічні, правові та природоорієнтовані засади управління екосистемами. Особливу увагу приділено ролі територіальних громад як ключових суб'єктів реалізації природоохоронних та відновлювальних заходів. Визначено пріоритетні напрями післявоєнного відновлення екосистем, зокрема рекультивацію деградованих земель, реабілітацію водних об'єктів та лісовідновлення. Розглянуто інтеграцію міжнародних стратегій відновлення, таких як Десятиліття ООН з відновлення екосистем і Європейський зелений курс, у національні плани розвитку. Досліджено взаємозв'язок екологічної політики та стратегій сталого розвитку територіальних громад. Показано значення інституційної спроможності та фінансових механізмів для ефективної реалізації природоохоронних заходів. Обґрунтовано необхідність комплексного підходу, що поєднує наукові, правові та економічні аспекти управління природними ресурсами. Монографія спрямована на формування науково обґрунтованих стратегій для забезпечення екологічної безпеки та сталого розвитку України.

Література

1. Закон України «Про стратегічну екологічну оцінку» від 20.03.2018. https://zakon.rada.gov.ua/go/2354-19

2. Конституція України. https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/254к/96-вр#Text

3. Закон України «Про охорону навколишнього природного середовища». https://zakon.rada.gov.ua/go/1264-12

4. Закон України «Про охорону земель» від 19.06.2023. https://ips.ligazakon.net/document/T030962

5. Закон України «Про екологічну мережу України» від 24.06.2004. https://online.budstandart.com/ua/catalog/doc-page.html?id_doc=46311

6. Закон України «Про стратегічну екологічну оцінку» від 04.10.2016. https://ips.ligazakon.net/document/JH2IJ00G

7. Принципи відновлення екосистем, якими слід керуватися в рамках Десятиліття Організації Об'єднаних Націй 2021–2030 років. https://www.decadeonrestoration.org/publications/principles-ecosystem-restoration-guide-united-nations-decade-2021-2030

8. UN Decade on Ecosystem Restoration 2021–2030 https://www.decadeonrestoration.org/

9. UNEP – UN Environment Programme. https://www.unep.org/explore-topics/ecosystems-and-biodiversity/what-we-do/decade-ecosystem-restoration?utm_source=chatgpt.com

10. Десятиліття ООН з відновлення екосистем. https://forest.gov.ua/news/vsesvitnij-den-ohoroni-navkolishnogo-seredovishcha-pochatok-desyatilittya-oon-iz-vidnovlennya-ekosistem

11. Стратегія екологічної безпеки та адаптації до зміни клімату України. https://mepr.gov.ua/wp-content/uploads/2022/08/NatsionalnaPolitykaAdaptatsiyiDoZK_mozhlyvostiTaNapryamyRoboty.pdf

12. Стратегія державної екологічної політики України на період до 2030 року. https://ips.ligazakon.net/document/T192697

13. Національний план відновлення України. https://ua.urc-international.com/plan-vidnovlennya-ukrayini

Information about the authors:
Kvasnii Zenovii Vasylyovych,
Candidate of Economic Sciences,
PhD student,
Private Joint-Stock Company "Higher education institution
"Interregional Academy of Personnel Management"
2, Frometivska street, Kyiv, 03039, Ukraine

Senkiv Viktor Mykolayovych,
Candidate of Technical Sciences, Associate Professor,
Associate Professor of the Department of Ecology,
Ivan Franko National University of Lviv
1, Universytetska street, Lviv, 79007, Ukraine

Danylenko Yurii Volodymyrovych,
Doctoral Student,
Private Joint-Stock Company "Higher education institution
"Interregional Academy of Personnel Management"
2, Frometivska street, Kyiv, 03039, Ukraine

CHAPTER 8

NATURAL ECOSYSTEMS: FIGHTING HUNGER, ENERGY AND RAW MATERIALS DEFICITS IN THE MODERN WORLD

Kichura D. B., Sobechko I. B.
DOI https://doi.org/10.30525/978-9934-26-654-6-8

INTRODUCTION

Today, half a billion people on planet Earth do not have enough food. To produce a sufficient amount of vegetable protein, from which farm animals create high-quality animal protein, agriculture needs large amounts of nitrogen fertilizers, which are produced by industry. The modern history of microbiological protein production began during the First World War in Germany – the use of yeast. Due to food shortages, baker's yeast was grown on an industrial scale and "stuffed" mainly sausage products, some dairy products and instant soups with it. Yeast has a significant advantage, feeding on cheap sugar solutions, while converting sugar into high-value protein. During World War II, thousands of people were saved from starvation with the help of yeast "flakes", but the hard times passed, and the experience was forgotten. Only in the 60s did they start building plants for the production of protein using microbes again, since humanity needed more and more of it. Along with the use of oil alkanes and alcohol, wood is a source of nutrients. But at the same time, wood cellulose is not broken down by yeast and must first be destroyed using acid into building "blocks" – sugars. Agricultural waste such as straw, cotton residues, potato waste, vegetables and fruits, containing no more than 5 % protein, can also be converted by microbes into valuable feed.

The pharmaceutical business today ranks third in terms of investments and profits after the drug trade and arms. For example, if in 2010 the profits of pharmaceutical companies reached 300 million dollars, then when the pandemic took place in 2002, 2003, 2009 the profits reached 1…2 billion dollars, as we see an impressive difference of 1000 times. Let's ask ourselves, who will miss such an opportunity to make money? Profits during the 2019 pandemic reached more than 200 billion dollars and are growing to this day, as more and more new strains of viruses appear, which require new research, and therefore further development of vaccines, antibiotics and other auxiliary

materials. Nevertheless, the main idea of developing biological energy sources, which, unlike oil and coal, are constantly renewed, has a great future. In many countries, agricultural waste unsuitable for other needs is rationally processed into alcohol. When processing sugar beets and sugar cane, they accumulate in the form of molasses, and in cheese production – in the form of sugar-containing whey. But alcohol is used not only to obtain energy, it is also used in industry as a solvent, as a raw material for the production of dyes, artificial fibers, adhesives and cosmetics.

1. Edible microbes

First of all, there is a shortage of products containing complete protein, such as: meat, fish, eggs, milk, legumes (beans, peas, soy). The problem is exacerbated by the fact that the Earth's population is increasing by approximately 70 million people annually; in order to cover at least the additional need for 2 million tons of protein caused by population growth, it would be necessary to grow protein-rich soy on an area of 40 million hectares. It is precisely in regions where there is a shortage of protein foods that the highest rates of population growth are noticeable with little development of agriculture and industry. To obtain 1 kg of animal protein, 5–10 kg of vegetable protein are needed, thus, already at this stage part of it is "lost", and this is in addition to the colossal losses of products that are caused by the "work" of agricultural pests, carelessness in harvesting, transportation and storage. Microorganisms could effectively help solve the food problem of mankind. They not only produce medicines, wine and cheese – they are also edible! They contain high-quality proteins, fats, sugars and vitamins.

As early as 1521, after the conquest of Mexico, the Spaniard Bernal Díaz del Castillo reported that the Aztecs ate strange little "pies" similar to cheese. Today it is known that these "pies" were made from unicellular algae that lived in Mexican lakes. Thousands of kilometers away from Mexico, the African natives living on the shores of Lake Chad, the Kanevu tribe, have also eaten unicellular blue-green algae of the genus Spirulina since time immemorial. This algae grows in significant quantities in Lake Chad, it is caught, dried and eaten like vegetables. In fact, algae are good protein producers, they double their mass in just 6 hours. For example, cereals need 2 weeks for this, chicks need 4 weeks, piglets need 6 weeks, and calves need 2 months. Therefore, in many countries, science is making a lot of efforts to create an "algae farm". This requires quite numerous reservoirs, namely pools with a large surface area of water. There, algae will be able to be sufficiently irradiated with sunlight, with the help of which they form sugar and then protein from carbon dioxide, water and mineral nutrients.

The need for light and air does not require any financial costs, and to encourage algae to grow abundantly (numerously), only cheap mineral supplements are needed. On the same area, Spirulina algae produces 10 times more protein mass than wheat, and with a higher protein content. When harvesting, the algae are simply "strained" through a mesh, later they are dried in the air and substances are added to them that improve the taste. After that, the product is ready for consumption and goes on sale. Why haven't similar large-scale farms been created in areas where the population is starving? Only because even such a simple technology is missing there, and in many regions, water supplies are very limited, which is quite expensive[1, 2, 3].

2. "Homemade liver" from microbes

Bacteria, yeast and other lower fungi grow even faster than algae. Bacteria double their mass in 20 minutes to 2 hours, and the bacterial mass can consist of 70 % protein. It has already been said that algae synthesize protein 100,000 times faster than a cow. At the same time, a cow gives us in the form of meat about 10 % of the nutrients that the cow itself consumes in the form of plant food, 0.9 % of the cow's feed for human nutrition is lost! In bacteria, yeast and fungi, almost the entire mass of nutrients is converted into proteins, sugars and fats suitable for use by humans and animals. Over time, it was discovered that microorganisms are able to consume not only sugar-containing nutrient solutions, but also assimilate oil components – alkanes (saturated hydrocarbons of the general formula $C_n H_{2n+2}$). Inedible for humans and animals, solid alkanes – paraffins – are only microbes able to utilize and convert into valuable protein. In 1963, the first experimental installations began to operate on pre-purified oil samples, growing yeast of the genus Candida, which consumed alkanes and at the same time multiplied very quickly, forming protein. About 1 ton of oil was obtained, containing 600 kg of protein. Moreover, much higher quality diesel fuel was obtained from the oil that remained and did not contain alkanes. At the very beginning of the production of yeast from alkanes, many doctors and veterinarians expressed concerns that the protein obtained in this way would be toxic to higher mammals. But many years of research have shown that yeast protein is harmless, thanks to many years of experiments this protein is one of the most studied food and feed products. The discussion between scientists and

[1] Біотехнологія : підручник / В. Г. Герасименко, М. О. Герасименко, М. І. Цвіліховський та ін. ; під ред. В. Г. Герасименка. Київ : ІНКОС, 2006. 647 с.

[2] Юлевич О. І. Біотехнологія : навчальний посібник / О. І. Юлевич, С. І. Ковтун, М. І. Гиль ; за ред. М. І. Гиль. Миколаїв : МДАУ, 2012. 476 с.

[3] W.-D. Fessner Biocatalysis: From Discovery to Application. 2000. 268 p.

manufacturers about the possibility of widespread use of microbiological protein (vitamin protein concentrate VPC) as a feed additive in livestock, poultry, and fish farming has taken on a truly dramatic color today. Scientists associate the difficult ecological state of some regions of countries and the population with the location of VPC production plants in these areas[4], [5].

Yeast protein exceeds all fodder plants in terms of its nutrient content. Experiments have shown that 1 ton of yeast can replace 7-8 tons of feed grains. The first large-scale enterprise for the production of yeast based on alkanes began operating in 1973, with a capacity of 70,000 tons per year. Subsequently, 8 giant factories for the production of "alkane" yeast operated. Such enterprises, where valuable protein was produced from oil, operated in Germany in the city of Schwedte (the final point of the Druzhba oil pipeline), as well as in Romania. A similar "protein factory" was also built in the People's Republic of China, since the oil fields of this country are characterized by a high content of alkanes. Even Arab oil-exporting countries are now showing great interest in this biotechnology, because the production of feed protein from their own oil, with its colossal reserves, is economically profitable, because then there is no need to cultivate land in the deserts that occupy the main territory of these countries. With proper biotechnological production, there is no need for expensive imports of grain, beans, soybeans or fish meal. In the mid-70s, as a result of an unexpected rather strong increase in oil prices, countries that do not have their own oil production were forced to look for another, cheaper source of nutrients for microbes that produce protein. Methyl alcohol, which was obtained in pure form from coal or oil, was proposed as such a substitute. In the UK, Bacterium Methylophilus methylotrophus "works" at one installation for the synthesis of microbial protein from methanol; The annual productivity of this bacterium is 50,000 tons of protein feed "prutin", which is used mainly in the cultivation of broiler chickens and fattening calves. A bioreactor with a volume of 150,000 liters of absolutely sterile nutrient solution in which the bacteria live at 35 °C, consuming exclusively methanol, ammonia and oxygen from the air. Bacteria are continuously released from the bioreactor; later they are treated with hot steam (the vital activity of the bacteria stops), and the obtained biomass in the form of rather large lumps is dried. As a result, a granular product is obtained, which has the color of burnt sugar; the brand name is prutin.

Since 1985, microbial protein has also been used in the food industry for the production of various dishes and semi-finished products. In the UK,

[4] Roger L. Lundblad Biochemistry and Molecular Biology Compendium. 2007. 422 p.

[5] Lilia Alberghina Protein Engineering For Industrial Biotechnology. 2003. 374 p.

specialized stores sell puff pastry with filling, similar in appearance and taste to beef. You can feel the "meat fibers" in this dish! The new bioproduct mycoprotein (from the Greek mykee – mushroom, protein – protein) is made from the Fusarium fungus. It contains 45 % protein and 13 % vegetable fat, that is, it is not inferior in nutritional value to many varieties of meat. The mushroom threads (mycelium) are so "interwoven" with each other that an external analogy with meat fibers appears. And as you know, fibrous food is extremely important for good digestion. Fusarium grows on all sugary substances: in Europe, for example, potato waste is used for this, in America – cassava roots (cassava (manioc) is a plant of the Euphorbia family, which is grown in areas with a tropical climate, flour is obtained from its roots), fruits or sugar cane[6]. Along with "beef", "chicken meat" is also made from Fusarium. Soon, stores will be able to buy at least 10 types of pies, minced meatballs, salads and delicacies made with the addition of microbial protein. In Finland, with the help of lower fungi that grow on toxic wastewater from a pulp and paper factory, 10,000 tons of valuable feed protein are produced annually. Without "microbial treatment", these wastewaters cause mass fish deaths in lakes and rivers. In this case, biosynthesis solves two problems at once – obtaining protein from non-expendable nutrient solutions and protecting the environment[7, 8].

3. Plants that fertilize themselves

Nitrogen, along with carbon, hydrogen and oxygen, are the main components, the so-called small "building blocks", that make up the compounds found in all living things, proteins and hereditary material. The air contains 78 % by volume of nitrogen, but neither humans nor animals can absorb gaseous nitrogen. The same applies to a significant part of plants, which are only able to absorb chemically bound nitrogen in the form of ammonium salts, nitrates or urea.

The ancient Romans already knew that growing legumes, such as clover, lupine, alfalfa, beans and peas, increases soil fertility. When legumes were first cultivated in a field, they were first spread on it with soil from fields where plants of this family were already growing. Of course, the Romans could not yet know that they owed their agricultural successes to nitrogen-fixing nodule bacteria that live in the root systems of certain types of legumes. In symbiosis with the plant, these microbes convert atmospheric nitrogen into

[6] Ehud Gazit, Anna Mitraki Plenty of Room for Biology at the Bottom: An Introduction to Bionanotechnology. 2013. 216 p.

[7] Т. Пирог Біохімічні основи мікробного синтезу Київ : Ліра, 2019. 349 с.

[8] Трохимчук І. М., Плюта Н. В., Логвиненко В. П., Сачук Р. М. Біотехнологія з основами екології : навчальний посібник. Кондор, 2019. 539 с.

ammonia, one of the nutrients that the plant absorbs. Thus, the bacteria supply nitrogen fertilizers to the soil, and in return receive other nutrients from the plant. Ammonia is also produced in industry by the so-called Haber-Bosch process: atmospheric nitrogen at 550 °C and a pressure of several hundred atmospheres is combined with hydrogen to form ammonia, which is then applied to the soil as a "nitrogen fertilizer" (ammonium salts). The chemical method of producing ammonia requires enormous energy costs, and energy is becoming increasingly expensive, which is why fertilizer prices have increased significantly. As a result, nitrogen fertilizers become inaccessible to agriculture precisely in those countries where increasing yields is a priority task in order to feed a half-starved population[9].

To this should be added that, generally speaking, plants absorb only less than half of the amount of fertilizers that are introduced into the soil by humans. A significant part of the fertilizers is washed out of the soil with rainwater and later "oversaturates" lakes and rivers. As a result, microorganisms multiply excessively in water bodies, which completely consume the oxygen dissolved in the water, after which significant numbers of these microorganisms die. Along with the bacteria, fish, crayfish and all other living creatures that require oxygen die[10].

Bulbous plants form ammonia at normal temperature and pressure. For example, red clover produces 100–150 kg of nitrogen "fertilizers" per 1 ha of crop with the help of its own bacteria. In general, microbes remove approximately 100 million tons of ammonia from the air annually, compared to 40 million tons produced industrially at "hellish" temperatures and high pressure. Moreover, tuber bacteria once again demonstrate the advantage of biological processes that save energy. The formation of "nitrogen fertilizers" from the air by microbes has another advantage: they are not washed away by rain – therefore, they are completely preserved for plants and do not pollute water bodies. Thus, in 2000, American scientists invented a type of red worm that devours garbage with the formation of beneficial microflora: this creature is able to digest 1 kg of garbage per day and obtain 250 g of humus rich in useful and nutritious substances. This method of garbage processing has become interested in Japan, where entire islands have been constructed from garbage, on which people live and work. In many countries, experimental attempts are being made to colonize other non-legume crops with nodule bacteria. Genetic engineers are also trying to transfer genes from nitrogen-fixing bacteria into cereal cells.

---

[9] Пирог Т. П. Загальна мікробіологія : підручник. Київ : НУХТ, 2004. 471 с.

[10] Яворська Г. В., Ґудзь С. П., Гнатуш С. О. Промислова мікробіологія. Львів : Вид. центр Львів. нац. ун-ту ім. І Франка, 2008. 256 с.

4. New plants from a test tube

Before cereals "learn" to extract nitrogen directly from the air, a lot of research needs to be done. At the same time, new high-yielding plant varieties are already being propagated in a test tube using biotechnological methods. First, scientists cultivate plant cells (in principle, by analogy with the cultivation of microbes) in nutrient solutions. Later, using enzymes, they carefully dissolve the cell walls. Such a "naked" single cell is able to divide and multiply, forming a cluster of cells (callus) in the nutrient solution. After adding certain specific nutrients and growth-promoting substances, full-fledged plants emerge from this cluster of cells after some time! In this way, thousands of plants can be grown in a test tube from 1 g of plant cells. Asparagus, pineapple, strawberries, alfalfa and ornamental plants have already been propagated in a similar way. Now, on 1 m^2 of laboratory space, 100,000 such plants can be grown in a short time, all from the cells of one "superplant". The resulting offspring are called clones (from the Greek clon – branch). All of them – like identical twins – have the same hereditary material. For example, through cloning, it was possible to obtain 1,000 young olive palms, which were planted in Southeast Malaysia. These palms are direct descendants of one palm tree, which turned out to be extremely resistant to diseases, and also produced 20–30 % more palm oil than ordinary palm trees. At the first stage of cloning, a leaf is cut from the plant that is proposed for propagation. In a solution containing enzymes that destroy cell walls, thousands of single "bare" cells (protoplasts) are formed that do not have walls. In a nutrient solution, the protoplasts form new cell walls, and the cell begins to divide. After about 2 weeks, each individual cell forms a cluster of cells (callus). The callus is placed on a special nutrient medium, where it develops to its full potential and begins to form a shoot. On the second nutrient medium, the shoot grows into a small plant with roots, which is later planted in the ground. Thus, from a single leaf, thousands of new plants with the properties of the mother plant can be grown in the shortest possible time.

If plant cells can be cultivated in nutrient solutions, like microorganisms, why not also try to use them using genetic engineering methods? Plants that are resistant to drought and plant protection agents (herbicides), that grow even on saline soils and are characterized by a large amount of protein – these are the goals set by genetic engineering specialists. Unfortunately, plasmids cannot be directly introduced into plant cells, as was the case with bacteria. But scientists have found a "snake" for genes here too: the widespread soil bacterium Agrobacterium tumefaciens. This bacterium infects plant cells and causes them to grow uncontrollably and form galls (disease-causing growths

on plants). In the galls, the bacterial genes enter the plant cells with the help of bacterial plasmids. Later, the modified plant cells of the galls are cloned in a test tube, as described above, and whole plants are grown from them again. Thus, it is indeed possible to transfer such properties to cultivated plants as increased protein productivity, nitrogen fixation from the air, or resistance to drought and pests. Out of pure scientific curiosity, an attempt was made to incorporate firefly genes into tobacco plants. Tobacco plants subjected to such manipulations emitted a greenish-yellow glow in the dark – proof that the experiment was a success. Soon it will be possible to create plantations of trees that grow quickly specifically for the needs of the pulp and paper industry. The basis for them can be transgenic aspen, trees with introduced genes outgrew control ones in growth by 5–10 times.

Foreign genes are introduced into the plant using special agrobacteria or by "shelling" with a gene gun. In this case, a microscopic "ballistic projectile" is covered with a thin layer of gold or tungsten particles, on which genetic material is placed. After firing, the particles penetrate the plant cells, introducing genetic constructs with the necessary genes. The developed design of a gene gun using compressed air turned out to be very successful. With its help, it was possible to obtain more than 30 transgenic plants – wheat, potatoes, tomatoes, cucumbers, peas, soybeans, strawberries, rapeseed, aspen, which was already mentioned, and cedar.

All these plants have many unique features – increased yield, resistance to weather vagaries, intensive growth. But the specialists are in no hurry to transfer the resulting plants to production, although they work only with those genes that are primarily present in all plants. They want to make sure that they are completely safe and harmless to humans, and that the process of attenuation of the expression of the introduced genes will not begin in the "alien environment". To this end, the biochemical and physiological features of the transgenic plants created here are being studied in the newly created laboratories of the institute.

In 1999, the American The Monsanto company offered 4 regions of Ukraine to grow GM potatoes (Volyn, Vinnytsia, Rivne, Khmelnytskyi). Two potato crops that they harvested were buried in Cherkasy region, but it must be borne in mind that firstly, not the entire crop was buried, and secondly, pests remained that had developed immunity to herbicides and became much more dangerous and resistant to the effects of pesticides. They wanted Ukraine to become a springboard for growing GM plants. Although, if you believe today's official data, 40 % of GM corn, wheat, potatoes are already grown in our country, 80 % of rapeseed and soybeans in Ukraine are also GM. Despite the fact that Ukraine has a law prohibiting the use

of GM plants in food production and even to meet the needs of the chemical, fuel or energy industries.

In 2010, 150 million hectares – about 10 % of the area on which agricultural crops are grown – were used for the production of GM plants. GM fruits and vegetables have no taste or smell, and during their storage, which lasts up to 3–6 months, they do not lose their consumer properties at all. The disadvantage of their storage is that the longer they are stored, the more proteins accumulate in them, which negatively affect the human body. In 2020, more than 210 million hectares in more than 30 countries around the world are occupied by GM plants. In 2008, the American subsidiary of Monsanto Engine encroached on the most sacred, medicine, proposing to introduce a gene into a banana that has rubella antibodies in order to kill two birds with one stone. On the one hand, to relieve children of the fear of vaccination, and on the other, to support its production[11].

5. Microbes against pests

In some African countries, insects or rodents destroy about 60 % of the harvest. In Europe, crop losses are from 25 to 40 %. In addition, in tropical countries, insects are carriers of dangerous viral diseases, such as malaria (Anopheles mosquito) or sleeping sickness (Tsetse fly). Malaria is the first disease to affect 300 million people every year. In terms of its scale, malaria ranks first in the world among other diseases on Earth.

Various chemicals called insecticides are used to combat insects; annual costs for these products are approximately $ 2.5 billion. But not only pests die, but also all other insects that come into contact with insecticides. Therefore, insecticides disrupt the common habitat of animals and plants, and animals that consume these insects, especially birds, are gradually poisoned. Insecticides eventually get into water and food. In addition, insecticides are no longer effective against approximately 400 insect species. Because these species have become resistant to the drugs used. In order to combat such resistant species, it is necessary to either increase the dosage of poison or use new insecticides. Therefore, many countries are searching for environmentally friendly biological methods of pest control.

Today, in the USA and other countries on different continents, millions of tiny (no more than 1 mm long) Trichogram riders are already grown by the “flow method” and transferred to fields affected by pests. Each Trichogram female pierces up to 300 eggs of other insects and lays her eggs in them.

[11] Мельничук М. Д., Новак Т. М., Кунах А. В. Біотехнологія рослин. Київ : Поліграф Колсантинг, 2003. 520 с.

Trichogram caterpillars, which are formed from the eggs of parasites, eat the contents – the eggs of the host and thus protect the plant.

Bacteria, fungi and viruses are also used to combat pests. Thus, Bacillus thuringiensis, which became known in Thuringia as a moth larva exterminator, has proven itself well as a caterpillar "killer". Fields are sprayed with aqueous suspensions of these microbes, and the caterpillars eat them along with their food. The microbes form poisonous protein crystals that destroy the caterpillar's intestines, causing their death. Bacillus thuringiensis is currently grown in bioreactors. One ton of the microbial preparation is enough to rid 300 hectares of forest, beet fields, cotton crops or fruit tree plantations of pests! It was also possible to transfer the gene that controls the formation of poisonous protein crystals from Bacillus thuringiensis to bacteria that inhabit the roots (Pseudomonas florescens). Now, the caterpillars of the winter scoop, which damage cereals by gnawing at the roots, die if they only ingest Pseudomonas bacteria transformed by genetic engineering methods with their food.

The combined use of Trichogramma riders and bacilli against cabbage moths has been tested. In this case, the "riders" reduce the number of butterfly eggs, while the bacilli kill only the caterpillars that have hatched. The new bacterial strains are specifically effective against the Colorado potato beetle. Insects that consume the leaves of forest trees, such as the oak borer or various types of silkworms, can be eliminated in the same way as houseflies, goldfinches or Anopheles mosquitoes, without harming other insects, including bees. In Eastern European countries, viruses are successfully used against the odd-toed silkworm and the nun, and in the USA against the spiny worm. Microscopic fungi are used to combat the Colorado potato beetle, apple fruit borer and insects. The so-called biological protection of cultivated plants is specifically aimed at harmful insects that are characterized by mass reproduction. In this case, the balanced coexistence of all living things is not disturbed and, in addition, no toxic substances enter our natural environment.

6. "Frost-resistant" bacteria

In addition to pests, unexpected night frosts in spring or early autumn also cause significant crop losses. But cold damages plants only when ice crystals form on them and inside their various parts (roots, stems, leaves).

It was discovered that billions of bacteria of the Pseudomonas syringae species live on plants and secrete proteins. Ice crystals form around the "ice-forming" bacteria and their proteins at sub-zero temperatures. Experiments have shown that if you get rid of these bacteria, then ice crystals do not form on plants almost down to -8 °C. Conversely, in the presence of "ice-forming" bacteria, ice crystals appear on plants at temperatures close to zero,

which damage plant tissues. These “harmful” bacteria have found a useful application: they are added to water in “snow cannons”: even with a slight cooling to create a snow cover in order to provide conditions for winter sports.

But another idea is more interesting: an attempt was made to transform bacteria “ice-forming” by genetic engineering methods, namely, to cut out from bacterial DNA the gene that controls the formation of protein from “ice”. After this “operation” the bacteria can no longer produce protein from “ice”. And indeed, ice crystals no longer formed around these modified bacteria! For the test, these bacteria were used to spray land plantings. It turned out that “frost-resistant” bacteria suppressed the development of bacteria – “ice-forming” and warned the plant against sudden drops in temperature. In this case, the strawberry bushes were only experimental plants, since the main task is to protect orange, grapefruit and lemon trees from frost. It is possible that in the future these plants, which are sensitive to sub-zero temperatures, can be grown in areas much further north [12].

These possibilities are constantly being tested. The fact is that some researchers fear that new microbes can spread throughout the world and disrupt the natural balance of various species. In this regard, biotechnology bears a special responsibility, because it is necessary to guarantee that new microbes will be completely safe and will not harm nature and humans.

7. Clean water thanks to the work of microbes

In 1892, the residents of Hamburg thought that they could take drinking water directly from the Elbe and Alster rivers. But such ideas had a tragic end – the residents of Hamburg were “mowed down” by cholera. The water has long ceased to be clean. It is a habitat for microbes, including the most dangerous pathogens of cholera. In large cities, wastewater treatment has become mandatory. Today, each resident of the city “produces” 150–200 liters of wastewater annually. When producing 1 ton of paper, the volume of wastewater is approximately the same as the volume of domestic wastewater of 1,000 people, and often the wastewater of one chemical plant corresponds in volume to the wastewater of a city with a million inhabitants.

The natural ability of rivers to self-clean, due to the activity of microorganisms, is now no longer enough, so wastewater must be decomposed with the help of microorganisms in giant treatment plants so that the wastewater can be discharged into rivers and lakes without harming the natural environment. When treating wastewater, microorganisms do

[12] Річард Доккінз Наука для душі нотатки раціоналіста / пер. з англ. Д. Прокопик. Київ : Наш формат, 2019. 384 с.

a particularly hard job. Consuming oxygen in the process of breathing, they use it to decompose substances (carbohydrates, proteins, fats) in wastewater to carbon dioxide and water, and on this basis grow and build their new cells. Treatment plants provide them with the best conditions for development, reproduction and destructive activity. These are giant "biofactories", and their "bioproduct" is clean water. When treating wastewater, macropollution is first removed from it: paper, pieces of wood, remnants of matter. Heavy particles of sand are deposited in sand traps. Only after this, the lighter suspended particles are concentrated at the bottom of the sedimentation tank in the sludge trap. This wastewater enters the aeration tank – an aerated tank, where ideal conditions for the life of microbes are maintained. In the aeration tank, bacteria, yeast and fungi form large flakes ("activated sludge") with wastewater substances, which are not decomposed due to the mucus (through mucus) secreted by the bacteria. The main problem of this bioprocess is related to the supply of oxygen to microbes. Microbes spend more than 1 g of oxygen to break down 1 g of sugar, and the solubility of oxygen in water at normal temperature is only 9 mg/l. Therefore, very soon after the start of the microbiological process, all the oxygen contained will be completely consumed by microorganisms. Thus, for the success of the business, wastewater in the aeration tank must be constantly mixed and enriched with oxygen. By the way, a person produces so much wastewater per day that microorganisms consume 54 g of oxygen for its decomposition. To ensure aeration of wastewater, the aeration tank is equipped with rotating brushes and a pipe through which air is pumped into the water. The air constantly "swirls" the activated sludge flakes, due to which they do not reach too large sizes, remain suspended and are well supplied with oxygen. Microbes of the flakes absorb wastewater substances, decompose them during respiration and multiply at the same time. Some of the microbial flakes are later deposited in secondary settling tanks in the form of sludge. A smaller part is returned to the aeration tank in order to have a sufficient number of microbes to oxidize the wastewater that is coming in again. All the sediment collected from the first and second settling tanks is decomposed in septic tanks or methane tanks (structures for fermenting sewage sludge with the help of microorganisms) by methanobacteria until the formation of "biogas" (methane). This gas can be used very efficiently by burning to obtain heat. The residual "fermented" sludge is dried and often used as fertilizer.

The tanks of treatment plants occupy large areas. This condition, however, is difficult to fulfill in industrial areas. Therefore, in recent years, biotechnologists have developed "small-sized" tower bioreactors with a height of about 15–20 m for wastewater treatment. Wastewater from industrial enterprises

often contains substances and poisons that are difficult to decompose, such as cyanide and mercury compounds. These substances are not decomposed by "normal" microbes, they even kill many microorganisms. Therefore, a search is underway for new highly productive strains of microorganisms that could utilize such toxic impurities. For example, Indian biotechnologist Ananda Chakrabarti has isolated "superbacteria" capable of breaking down highly toxic agents 2,4,5 – T (2,4,5 – trichlorophenolacetic acid), which the USA used during the Vietnam War to cause "leaf fall" in large areas of the jungle. Since the chemical compounds of this group of pesticides cause leaf aging – artificial leaf fall, they are known as defoliants. They are used in agriculture in the period before harvesting for defoliation of plants (removal of leaves), mainly in cotton. Professor Chakrabarti has also identified true "eaters" of oil. These bacteria "greedily" eat toxic oil residues and are used to quickly decompose oil in the event of disasters with oil tankers, when large areas of water are under threat of pollution by oil products[13, 14].

Over time, microorganisms that have multiplied in considerable quantities are eaten by other marine animals and thus quickly disappear. But disasters that occur with tankers are only a small percentage of oil pollution. Every year, about 6 million tons of oil enter the sea, a quarter of this amount is a result of cleaning empty tankers in the open sea, a third is with sewage brought by rivers. By the way, Professor Chakrabarti's "oil eaters" are the first in history "newly formed" living beings for which a patent has been issued. At the Institute of Biotechnology in Leipzig, strains of bacteria have been isolated that absorb and deposit mercury in their cells. If these "mercury collectors" are deposited on a filter, then mercury can be recovered from wastewater. Algae also have the ability to accumulate mercury, lead and silver in their cells and thereby purify wastewater. And yet, the shortest and easiest way to protect our planet's water basin is to develop production processes that do not emit any harmful products into the environment! This is exactly the goal that biotechnologists want to achieve.

8. Biosensors: Microbes signal pollution

How, in fact, do we know how much wastewater is polluted? The content of toxic and decomposing substances in wastewater can be signaled by microbes themselves. First, the oxygen concentration is determined in each sample, then microbes that live in wastewater are added to the samples. The

[13] Daniela Cardinale, Thierry Michon Enzyme Nanocarriers. 2015. 266 p.

[14] Ehud Gazit, Anna Mitraki Plenty of Room for Biology at the Bottom: An Introduction to Bionanotechnology. 2013. 216 p.

sample bottles are tightly closed and after 5 days, the oxygen content in each bottle is determined again. Samples with a high degree of pollution contain many nutrients, so microorganisms will consume more oxygen here than in samples with "clean" wastewater. But 5 days is a rather long period. During this time, heavily polluted wastewater manages to enter rivers in significant quantities. Therefore, an earlier "preliminary signal" is needed!

Over the past 10 years, "biosensors" have been developed – biological measuring probes that show the degree of pollution of wastewater in a few minutes. A biosensor is an electrode connected to an electronic display, which displays data on the oxygen content in a given liquid. A thin layer of microbes that live in wastewater and are retained on the electrode by a dense filter are applied to the surface of this electrode. By immersing such a biosensor in a liquid, it is possible to directly measure the "breathing" of microbes. In the case when the biosensor is in clean water, the microbes almost do not breathe, since too few nutrients are at their disposal and the biosensor gives a very weak (weak) signal. On the contrary, if the biosensor is immersed in a sample of wastewater containing many nutrients (i.e. heavily polluted), then the microbes receive a lot of "food", they breathe more intensively, consume more oxygen, and the biosensors respond with a signal of great strength. With this method, wastewater control can be carried out in one minute. With the help of such biosensors, it is also possible to determine the concentration of nutrients in the bioreactor. There are biosensors that work on the basis of enzymes secreted from microbes. For example, a device with a biosensor that carries the glucose oxidase enzyme on the surface of its electrode can determine with great accuracy in 1 hour more than 100 blood or urine samples whether they contain an increased amount of sugar compared to the norm, that is, diagnose diabetes. Biosensors are particularly suitable for serious tests. With their help, it is possible to check the health of 1000 people in a short time[15].

9. Renewable energy sources

In Brazil, hundreds of thousands of cars run on "new fuel". This fuel is ethanol! The impetus for the introduction of alcohol as a car fuel was the energy crisis that grew in the 70s, when oil prices on the world market suddenly rose sharply. Brazil had little oil, so its import quickly became a burden for the country. In search of a way out of this situation, plans were made to produce alcohol from vegetable raw materials.

[15] Дзядевич С. В., Солдаткін О. П. Наукові та технологічні засади створення електрохімічних біосенсорів / під ред. Г. В. Єльської Київ, 2005. 250 с.

Due to the considerable length and tropical climate of Brazil, growing sugar cane on large areas did not pose any technical difficulties. In this most powerful biotechnological project in the world, cane sugar is fermented with the help of yeast, forming ethyl alcohol. In 1995, 10 billion liters of alcohol were obtained! Thus, Brazil became the largest producer of alcohol in the world.

In addition to sugarcane, which grows well only on fertile lands, it is also proposed to introduce into production a starch-containing raw material – the cassava plant (manioc). Unlike sugarcane, potato-like cassava plants grow on depleted soils. But in them, it is first necessary to break down starch using amylase into sugars, which are then fermented by yeast into alcohol. Until now, it was believed that the Brazilian version of the biotechnological solution to the fuel problem was the best. But it turned out that in Brazil, significant areas of arable land are sown with "car feed". To produce enough alcohol to meet the annual fuel needs of cars with a mileage of 12,000 km, it is necessary to collect plants from 13,000 m^2 of arable land. Meanwhile, for the annual consumption of one person, only 800 m^2 is needed. In other words, one car takes food from about 18 inhabitants! But in Brazil, millions of people suffer from malnutrition! To this should be added environmental problems: for economic reasons, industrial effluents from distilleries are discharged into rivers untreated, turning them into dead waters, and tropical forests are cut down in vast areas – that is, the pursuit of alcohol only leads to violations of an already rather fragile and unstable natural balance. Wood waste can also be broken down using enzymes into sugars. In some countries rich in forests, so-called "energy plantations" are even being established. These are fast-growing tree species, the wood of which is regularly "harvested" every 3–5 years and processed into sugar, which is used as a source of nutrition for microorganisms. True, for many developing countries, wood has become as scarce as food in other countries. In some arid regions of Africa, the annual need for firewood per capita for cooking alone is only 0.5 m^3. The last forests are "burning", the desert is advancing further and further. But what will people use to heat their fireplaces tomorrow? Biotechnology offers a solution here too: the production of biogas.

10. Bioethanol Project in Ukraine

Ukraine cannot fully provide itself with energy resources and is forced to import a significant part of them, which is a significant import item and hinders the development of our economy. Many countries are in a similar situation, but economically developed countries have something to offer oil-exporting countries, and first of all, these are industrial products. States that

buy “black gold” abroad, despite the temporary drop in prices on the world market for oil, are forced to develop systematic measures to save energy consumption and look for alternative energy sources. It is also known that, based on the assessment of global oil reserves, the era of its depletion is approaching. Naturally, this will significantly exacerbate the energy problems of most countries in the world.

For Ukraine, the search for new alternative energy sources is of paramount importance today. In this regard, the role of biotechnology in providing humanity with alternative sources is increasing. After all, it is biotechnology that helps to utilize waste or plant biomass, as well as solid municipal waste (garbage) for energy recovery. Various forms of energy can be used to generate electricity, as well as as fuel for transport. There are several types of transport fuels that can be obtained from biomass – biogas (mainly methane), biodiesel and bioethanol. It is believed that fuel ethanol has the greatest potential, given the inexhaustible sources of its production. These can be herbaceous plants and wood, waste from agriculture and the wood processing industry. As well as household waste. Ethanol is the oldest product of biotechnology, which was born no less than 4000 years BC in Ancient Egypt and Babylon. In this technology, sugars (glucose and fructose and some others) are fermented anaerobically by yeast. Until recently, all ethanol obtained in this way was used to produce alcoholic beverages. Only small amounts of it, obtained chemically, have been used in industry, but over the past 25 years the situation has changed radically. Today, more than half of the world’s ethanol production is used as an additive to fuel for internal combustion engines (gasoline), and only 15 % – for the production of alcoholic beverages. For example, in 2000, world production of ethanol was 35 billion liters, food ethanol (alcohol needed for the production of alcoholic beverages) was produced 4 billion liters, ethanol used in the chemical industry – 10 billion liters, and fuel ethanol – about 20 billion liters. Only 7 % of ethanol is obtained by chemical synthesis, and 93 % – using yeast fermentation. About 60 % of the latter is produced from sugar, the rest – from grain. Interestingly, the production volumes of edible alcohol have remained unchanged since 1975, while the production of fuel ethanol has been increasing year by year (from 2 billion liters in 1975, to almost 20 billion liters in 2000, 30 billion liters in 2010, 35 billion liters in 2020).

Today, all fuel ethanol is produced biotechnologically – by fermentation, there are government programs to support the production of fuel ethanol. In 2000, Brazil produced 6.5 billion liters of fuel ethanol, which provided 13 % of its total energy needs and 19 % of its liquid fuel needs. This saved $36 billion that would otherwise have been spent on the purchase of

petroleum products. Previously, Brazil produced mainly anhydrous ethanol, which was used as fuel for cars with special engines. But recently, Brazil has been using additives as fuel in which the ethanol content is 26 % in gasoline and 3 % in diesel fuel. Such mixtures do not require changes in the design of internal combustion engines and diesel engines. The United States is also a significant industrial producer of fuel ethanol. Thanks to its production, the USA saves $1.5 billion annually on the import of petroleum products. In large cities with a population of more than 1 million people, in the winter they use only gasoline containing 10 % ethanol, the so-called UE gasoline, or gasohol. The sales volume of which in the USA is 12 % of the total gasoline sales. EU countries produce 2 billion liters of ethanol annually, but today they use less than 10 % as fuel. But the EU has adopted a bill that provides for the addition of 5 % ethanol to all types of gasoline by 2010, and up to 10 % by 2020. In addition to saving currency, the use of fuel ethanol in the form of gasoline-ethanol mixtures allows you to significantly reduce the content of harmful components in exhaust gases (carbon monoxide, oxides and oxides of nitrogen, and other volatile toxic emissions). Back in 1994, the USA adopted a special law, according to which gasoline must contain at least 2 % (by weight of oxygen) of oxygen-containing additives (mainly ethanol) to reduce exhaust toxicity. The positive effect of using bioethanol as fuel is extremely important, even global, because carbon dioxide, which is released during combustion, has a primary atmospheric origin. That is, it can be assimilated again by plants, which in the future will become a source of fuel ethanol. And when using minerals as fuel, CO_2 is released, which is an additional source of the greenhouse effect.

Fuel ethanol obtained from sugar cane fully pays for itself. Its production in Brazil has been growing by 4 % annually since 1990, and the cost price has decreased by 3 %. The reason for this is the scientific and technological progress of the industry, new varieties have appeared, sugarcane cultivation technologies have improved, new technologies for sugar extraction, fermentation and distillation have been developed. Ethanol production from corn, practiced in the USA, despite the reduction in the cost of fuel ethanol by 2/3 over the past 15 years (since 1990), is less profitable. But even today the USA provides serious tax discounts on fuel ethanol to make it cheaper than gasoline. According to the law that came into force in 2010, the discount is $0.014 per liter of gas. Such a tax policy is to some extent due to the constant support of low prices for petroleum products. Meanwhile, the real cost of petroleum products is much higher than the price at which they are sold (for example, in the USA, 4 times higher, taking into account the indirect costs of the US state for monitoring and cleaning the environment from harmful

emissions during the production and use of petroleum products, as well as for maintaining security in the main oil production areas in the Middle East).

Even in the USA, where corn is very cheap, maintaining the profitability of fuel ethanol production requires government subsidies, while for other countries, creating a profitable production process (so that ethanol competes with imported petroleum products in price) is possible with a further significant reduction in fuel ethanol prices. The main ways to reduce the cost of this product are alcoholic fermentation technologies that can replace raw materials for production or radically change the technology. The replacement of raw materials consists in using biomass of whole plants such as grass, wood, including agricultural waste, wood processing, and household waste instead of grain. Basically, such dry biomass consists of cellulose (glucose polymer), hemicellulose (glucose and xylene polymer), and lignin (aromatic alcohol polymer), abbreviated as lignocellulose. The use of such non-traditional materials makes the raw material base for producing fuel ethanol practically inexhaustible. Calculations show: using only agricultural waste, wood processing industry and municipal waste for fuel ethanol production will allow the USA to replace 40 % of gasoline with ethanol. Specially cultivating certain woody (alder, aspen, etc.) and herbaceous (in particular sorghum) plants for further conversion into ethanol could provide the remaining 60 %.

The problem of alcoholic fermentation of lignocellulose has been studied for at least 20 years. Various international conferences are attended. Special scientific periodicals are published “Biomass and Bioenergy”, “Renewable Energy”, “Bioresource Technology”, etc. But the problem turned out to be quite complicated. Lignocellulose consists of three biopolymers – cellulose, hemicellulose and lignin, the first two are hydrolyzed to the corresponding monomers, sugars, among which the main ones are glucose (up to 40 %) and xylose (up to 30 %). Methods of such hydrolysis: chemical or enzymatic are still far from optimal. Well-known baker’s yeast, which effectively ferment glucose to alcohol, but would be able to ferment xylose to ethanol, were not described at all until recently. Since there is no free xylene in nature. Nevertheless, such yeasts have been discovered, although they accumulate small amounts of ethanol.

Today, the most effective way to obtain ethanol from plant raw materials is simultaneous enzymatic hydrolysis with subsequent fermentation of free sugars. Enzymes – fungal cellulose and hemicelluloses, which effectively hydrolyze crushed lignocellulose, but function at a relatively high temperature of 45 °C, while known yeasts ferment sugar only at 30 °C. The cost-effectiveness and profitability of such production largely depends on the sale of ethanol. If ethanol is sold at $0.33 per liter, a fuel ethanol plant will

not be profitable without producing a second product, furfural. Even if the cost of transporting waste is $0.19 per ton of dry matter per 1 km (taking into account the idling in the opposite direction) and only 10 % of the waste is processed. The optimal plant size should process 4360 tons of waste per day. Significantly larger or smaller plants are unprofitable. The capital investment for building such a plant is $455 million. The annual profit would be $281 million, and the costs would be $173 million, so the annual profit (before taxes) would be $108 million.

If we conduct an economic calculation of ethanol production using herbal plants, the price of ethanol would be $0.62 per liter. At this price, ethanol production is profitable without the simultaneous production of other products. However, only practice can give a decisive answer regarding the profitability of ethanol plants. Since 2000, the first industrial plant for the production of fuel ethanol from bagasse – waste from sugarcane processing, mainly – the remains of plant stems and leaves, was launched in Brazil, with a capacity of 75 million liters of ethanol per year, the price is as close as possible to gasoline. The operation of such a plant was the first technological and economic test of the profitability of fuel ethanol production from lignocellulose in the conditions of using today's technologies. A positive result will allow the processing of the entire (whole) sugarcane plant into alcohol, and not just extractive sugar, without increasing the cost of transporting raw materials.

Ukraine has wide possibilities for industrial production of such ethanol. Since the state produces many agricultural products, annually accumulating considerable amounts of agricultural waste – straw, corn cobs, sunflower husks. In addition, significant amounts of solid household waste are collected, mainly consisting of lignocellulose. Ukraine is a large producer of edible alcohol, at the same time many alcohol plants are not operating at full capacity or are idle at all. In the future, the capacity of these plants can be used for biofuel production, but such production must be profitable. The cost of biofuel will depend on the tax policy of the state, its cost, which in turn is dictated by the production technology. Despite the fact that the creation of the latest technologies for producing biofuels is very relevant, until recently, scientific developments in this direction were not carried out at all in Ukraine. But while there are unresolved scientific problems of a more general nature, the solution of which would make the production of fuel ethanol more efficient.

One of these problems is the need to reduce the cost of the process of distilling ethanol from the fermentation liquid. The classical process is quite energy-intensive (63 % of all energy costs are distillation costs). This is due

to the relatively high boiling point of ethanol (78 °C). Several years ago, American researchers proposed stopping the process of alcoholic fermentation at the stage of acetaldehyde (boiling point 21 °C), which can be converted into ethyl alcohol in the process of chemical catalysis at room temperature. But so far, effective methods of stopping alcoholic fermentation at the stage of acetaldehyde formation have not been technologically developed. Scientists at the Lviv Institute of Cell Biology of the National Academy of Sciences of Ukraine first proposed using mutant strains of methylotrophic yeast, specially obtained at the institute, for fermentation, along with general cultures of alcoholic yeast. This indeed leads to the accumulation of acetaldehyde, a very volatile compound, as the final product, not ethanol, but acetaldehyde, a highly volatile compound that evaporates spontaneously at room temperature without any distillation.

All known industrial processes of alcoholic fermentation are periodic, that is, they require the fermentation process to be resumed after the accumulation of 10 % ethanol, which makes the latter highly toxic to yeast. Attempts to conduct continuous fermentation, in which the accumulated ethanol would be constantly removed and the sugar substrate for fermentation would be constantly added, were unsuccessful. The idea mentioned above – to use compatible yeast cultures for alcoholic fermentation with the formation of acetaldehyde as the final product – can also solve the problem of continuous alcoholic fermentation. If the fermentation is carried out at a temperature higher than the boiling point of acetaldehyde, the latter will not accumulate, but will evaporate spontaneously, and the process of its formation from sugars can be continuous.

As already mentioned, technologies for alcoholic fermentation of lignocellulosic raw materials are being developed all over the world, which would significantly reduce the price of fuel ethanol. But alcoholic yeast cannot ferment up to 40 % of the sugars of such hydrolysates. Other yeast strains have been found that can ferment all the sugars of hydrolysates, although the efficiency of such a process is very low. In Ukraine, unfortunately, no one has been engaged in alcoholic fermentation of hydrolysates and other waste until recently. But in recent years, Ukrainian and Belarusian scientists have achieved serious success in solving these problems. Domestic scientists today have unique yeast strains, as well as genetic structures (plasmids) that contribute to the genetic engineering improvement of such yeast. Ukrainian biologists were the first to discover thermotolerant strains of methylotrophic yeasts that can ferment both glucose and pentoses (primarily xylene) to alcohol. Such strains were of interest for the process of simultaneous enzymatic hydrolysis of lignocellulose with subsequent fermentation of the sugars formed to ethyl

alcohol or acetaldehyde, as mentioned above. Therefore, the new approaches to fermentation of the starting material developed by scientists will make this process more efficient and cost-effective.

11. Biogas will save tropical forests

"Wandering lights", known from fairy tales and sagas, were lit by witches and spirits in medieval German mythology to lure and destroy good travelers. The folk epic is based on real facts: in swamps, when there is a lack of oxygen, parts of dead plants, with the participation of microorganisms, form swamp gas – methane, which is capable of self-ignition, and it is then that a "wandering light" appears. If you "shake" the sludge in any dredge, you can smell biogas.

Methanobacteria, which produce biogas, are very sensitive to oxygen. It is assumed that these bacteria lived in the Earth's primary atmosphere. Then there was no oxygen in the atmosphere, but there was carbon dioxide, hydrogen, and the atmosphere had the temperature just necessary for the development of methanobacteria. If today they were given the same conditions in a swamp or an artificially created bioreactor, they would also produce methane. However, they would depend on the preliminary preparatory work of other bacteria, which, using their enzymes, break down wood, starch, proteins and fats into the building blocks of which they are composed and ferment the latter to acetic or butyric acids, hydrogen or carbon dioxide. In nature, approximately 800 million tons of methane are produced annually as a result of the activity of bacteria. This is approximately the same amount as the amount of natural gas extracted by mankind. In the People's Republic of China, there are currently 11 million small, technically very simple installations that supply the extracted "biogas". These "biogas" installations are presented in the form of small, hermetically sealed tanks in which animal and human excrement and plant waste are shaken. When the tanks are heated, bacteria produce methane, which is excreted and used for household needs. Biogas is a valuable fuel, 1 m^3 of it gives as much energy as we get from burning 1 liter of fuel oil. It turned out that instead of the senseless burning of dry manure, plant residues and forest wood, energy can be obtained in the form of biogas. Such biogas burns with the formation of carbon dioxide and water, and in the "bioreactors" remains a natural fertilizer – sapropel. Sapropel – contains extremely important nutrients for plants – nitrogen, phosphorus and potassium salts. Due to which it is possible to reduce the import of fertilizers. In India, 50 million tons of cow dung and 30 million tons of other waste are still burned, because many villagers are too poor to buy a "biogas" installation themselves, and, in addition, to obtain

sufficient quantities of biogas, it is necessary to keep several cows. Here in the People's Republic of China, large "biogas" plants are often operated collectively by villagers from the entire village. These plants are also used for health protection: after all, hermetically sealed tanks with pathogens of various diseases are killed by high fermentation temperatures.

So, "biogas" plants are beneficial for residents of small settlements, districts and villages, especially in hot countries. They not only do not take away food and the best arable land from people, as is the case with the production of alcohol from plants, but even increase income for agriculture. Their widespread use can save tropical forests, stop the spread of deserts and make remote areas fertile with the help of fertilizers.

In Europe, such reactors would solve the problem of waste in large livestock complexes. The fact is that liquid animal feces (manure) can only be partially used as fertilizer, otherwise they will significantly overload the soil. After all, up to 45 liters of manure accumulates from a dairy cow or 10 pigs per day! But from this amount you can get 2 m^3 of biogas! For example, a "biogas" plant near Leipzig produces methane from the feces of more than 1,000 cattle. The energy obtained is enough to heat the cowsheds all year round[16].

12. Silent mining

Recently, copper mining has been carried out so intensively that copper deposits with a high copper content have become a rarity. Mining is moving to deeper and deeper areas. Energy costs for mining are increasing dramatically. As early as the 18th century, the Spaniards extracted copper in their mines near Riotingo largely from copper-containing mine water. The water had already leached the copper salt from the rock. But only 50 years ago, no one knew that bacteria were involved in this process: they help convert the poorly water-soluble "copper" into a water-soluble salt form.

Nowadays, microbes are purposefully used to leach copper, and they already account for 20 % of all global copper production, primarily from rocks with a low copper content. It is the bacteria of the genus Thiobacillus (from the Greek theion – sulfur) that help extract metal from the rock. They feed not on sugar, but on sulfur and iron! They are able to multiply even in the presence of strong acids, moreover, they themselves are able to produce sulfuric acid. During biological leaching of ore, millions of tons of waste (overburden) rocks containing sulfur and copper are first transported to collection points.

[16] Яблонський В. А. Біотехнологія відтворення тварин : підруч. / В. А. Яблонський. Київ : Арістей, 2005. 296 с.

Overburden rocks (overburden) are rocks that cover and contain the body of a mineral in the massif and are subject to extraction during open-pit mining of the deposit. These rocks contain small amounts of valuable copper. along with iron. There are known dumps with a height of more than 400 m, which contain 4 billion rocks that would have previously remained unused. They are irrigated and soaked with thousands of cubic meters of water. It is not necessary to pre-contaminate the heaps with Thiobacillus bacteria, because they are present everywhere. In 1 g of sulfur-containing rock, more than 1 million cells of Thiobacillus bacteria live. As water penetrates, the bacteria multiply. These tiny helpers first convert poorly soluble iron salts into a readily soluble salt – iron sulfate – with the concomitant formation of sulfuric acid. Iron sulfate, with the help of sulfuric acid, converts water-insoluble copper sulfide contained in the rock into copper sulfate. After that, a blue solution of copper sulfate begins to seep out at the foot of the heap, which is collected in large collections. Now, using some technical method, it is easy to obtain pure copper. The residual liquid formed during the leaching of ore, which does not contain copper, but contains sulfuric acid and bacteria, is sprayed over the heap again.

It is quite possible that in the future, using "bio-development" of deposits, it will also be possible to obtain uranium, lead, nickel and cobalt. Apparently, coal with a high sulfur content can also be "desulfurized" by the interaction of sulfur bacteria and thus make its use safer for the environment. Even more promising than leaching of rock heaps is ore leaching directly underground. For this, the rock does not need to be removed to the surface at all. The adit is simply sprayed or flooded with water. "Bio-development" of deposits is also beneficial in old, already abandoned mines. Bacteria can probably help make mining safer. Serious disasters constantly occur in coal mines due to a terrible gas – methane, which accumulates at the bottom of the excavations, which ignites as a result of an accidental spark. Thus, bacteria were "sprayed" on some mines and pits, which in 2-4 weeks almost completely converted methane into non-flammable carbon dioxide[17, 18].

Today, microbes can also be useful in oil extraction. To date, only a third of the total reserves of oil fields have been extracted, since oil very rarely forms large underground "lakes" and is often firmly bound in the pores of rock. Therefore, today, along with real wells, water is pumped into oil formations in order to squeeze out the remaining oil. But water is too

[17] Козлова І. П., Радченко О. С., Степура Л. Г. та ін. Геохімічна діяльність мікроорганізмів та її прикладні аспекти. Київ : Наук. думка, 2008. 520 с.

[18] Peter Grunwald Industrial Biocatalysis 2014. 1232 p.

"liquid", it easily flows through the oil "placers" of rock. It is necessary to make the water more "viscous", and for this they found a means – a sugar-containing substance secreted by bacteria of the genus Xanthomonas, called xanthan. But first, the water is mixed with a surfactant (soap), the mixture is pumped into oil rocks to release it. By the way, such "soap" can also be formed by bacteria themselves. After that, xanthan water is given, which squeezes the oil out of the well under high pressure. There are also projects to "pump" microorganisms directly into oil-bearing strata, provided they are provided with oxygen: the action of bacteria produces gases that, due to the pressure created, will force oil sources to emerge more vigorously from the ground, for example in the form of a fountain. Xanthan is one of the very first products obtained in a bioreactor, and was previously unknown. So far, the young biotechnological industry supplies only some of these new "bioproducts". But already today they demonstrate the grandiose possibilities of the bioindustrial future[19, 20].

CONCLUSIONS

Biotechnology plays an extremely important role in the greening of industrial production based on the creation of waste-free processes: the use of biotechnological processes for water purification, biological methods for destroying crop pests are confidently displacing seemingly competitive chemical insecticides. Thanks to biotechnology, energy – and resource-saving production has been developed and implemented. Biotechnological processes are the basis for obtaining feed and food protein: today in the world a considerable part of it is produced using microbiological oil processing. Renewable energy sources are obtained using biotechnology. Biogas plants will not take away food, land from residents, but will even increase agricultural incomes and are quite profitable and quickly pay for themselves. Their use will stop the spread of deserts and make remote lands fertile and preserve significant forest areas of our planet. Biotechnological stages of production processes are implemented using living organisms. It is worth emphasizing that the basis of most classical methods of biotechnology is enzymatic processes and in most cases the objects of research are microorganisms. However, other living organisms are also of great importance – plants and animals, the improvement of which is carried out using traditional methods of genetics, selection, physiology, biochemistry, etc.

[19] Andreas S. Bommarius, Bettina R. Riebel-Bommarius Biocatalysis: Fundamentals and Applications. 2007. 634 p.

[20] Nicholas J. Turner, Luke Humphreys Biocatalysis in Organic Synthesis: The Retrosynthesis Approach. 2018. 416 p.

The universal nature of modern biotechnology is manifested in the widespread use of methods of cellular and genetic engineering, which are based on the development of molecular genetics, which provides opportunities for genetic reconstruction of living organisms in the directions desired by researchers. The main goal of these studies is to obtain the greatest possible diversity of organisms through genetic reconstruction, which could be used not only for the production of qualitatively new products, but also for the processing of various organic and inorganic substances.

Humanity expects the creation of such cell cultures, with the help of which it will be possible to produce valuable medicines, fight a number of hereditary, cancer, cardiovascular and other diseases, contribute to the purification and improvement of the ecological state of the environment. Particularly promising is the development of new disease-resistant, highly productive plant forms with improved product quality. The pace of biotechnology development can currently be compared to the impressive progress of computer technology more than 20 years ago, and the impetus for this was the birth of genetic and cellular engineering.

The processing of plant waste into energy sources has a significant economic effect. Biofuel production is becoming purposeful, although it was previously a by-product of the production of feed and food products. To obtain biofuels, not only plant or animal waste is used, but also cellulose and hydrocarbon and industrial waste. With the help of the yeast Saccharomyces cerevisiae, ethanol is obtained from plant raw materials (sugar cane, cassava, sugar beets, molasses, potatoes, wheat grains, corn).

SUMMARY

On an industrial scale, biotechnology is a bioindustry that includes, on the one hand, industries in which biotechnological methods replace traditional ones, and on the other, industries in which biotechnology plays a major role. Among the first in the chemical industry is the synthesis of artificial seasonings, polymers and raw materials for the textile industry, in the energy sector – the production of methanol, ethanol, biogas and hydrogen, in the biometallurgy sector – the extraction of metals. In the second group of industries, biotechnology is involved in the production of products (cultivation of yeast, algae, bacteria to obtain proteins, amino acids, vitamins, and for the use of their enzymes), increasing agricultural productivity (cloning and selection of plant varieties based on tissue and cell cultures, production of bioinsecticides); the pharmaceutical industry (development of vaccines, synthesis of hormones, interferons and antibiotics); environmental protection and reduction of its pollution (wastewater treatment, household

waste processing, composting, as well as the production of compounds that are broken down by microorganisms). The oldest biotechnological process is fermentation, improving, increasing the efficiency, and studying the many biochemical reactions inherent in microorganisms, went in parallel with the release from the cells of bacteria and fungi of substances that replaced synthetic products, namely hypotensive, anti-inflammatory drugs and antiparasitic agents. Modern biotechnological processes are based on recombinant DNA methods, the use of immobilized enzymes, cells and cell organelles. The technology of immobilized enzymes has been successfully used for the production of semi-synthetic penicillins, fructose concentrate, even more effective immobilized cells and cell organelles containing the necessary genes for the synthesis of complex compounds. Biotechnological processes related to microbiology and enzymology play an important role in the cultivation of viruses, in the production of vaccines, for the production of interferon, as well as for the synthesis of monoclonal antibodies by hybridoma cells. This development has also affected plants, the cultures of which are used for the synthesis of various substances, both common: alkaloids, and other secondary metabolites, and exotic idioliths.

Bibliography

1. Біотехнологія : підручник / В. Г. Герасименко, М. О. Герасименко, М. І. Цвіліховський та ін. ; під ред. В. Г. Герасименка. Київ : ІНКОС, 2006. 647 с.
2. Юлевич О. І. Біотехнологія : навчальний посібник / О. І. Юлевич, С. І. Ковтун, М. І. Гиль ; за ред. М. І. Гиль. Миколаїв : МДАУ, 2012. 476 с.
3. W.-D. Fessner Biocatalysis: From Discovery to Application. 2000. 268 p.
4. Roger L. Lundblad Biochemistry and Molecular Biology Compendium. 2007. 422 p.
5. Lilia Alberghina Protein Engineering For Industrial Biotechnology. 2003. 374 p.
6. Ehud Gazit, Anna Mitraki Plenty of Room for Biology at the Bottom: An Introduction to Bionanotechnology. 2013. 216 p.
7. Т. Пирог Біохімічні основи мікробного синтезу Київ : Ліра. 2019. 349 с.
8. Трохимчук І. М., Плюта Н. В., Логвиненко В. П., Сачук Р. М. Біотехнологія з основами екології : навчальний посібник. Кондор, 2019. 539 с.
9. Пирог Т. П. Загальна мікробіологія : підручник. Київ : НУХТ, 2004. 471 с.

10. Яворська Г. В., Ґудзь С. П., Гнатуш С. О. Промислова мікробіологія. Львів : Вид. центр Львів. нац. ун-ту ім. І Франка, 2008. 256 с.

11. Мельничук М. Д., Новак Т. М., Кунах А. В. Біотехнологія рослин. Київ : ПоліграфКолсантинг, 2003. 520 с.

12. Річард Доккінз. Наука для душі нотатки раціоналіста / пер. з англ. Д. Прокопик. Київ : Наш формат, 2019. 384 с.

13. Daniela Cardinale, Thierry Michon Enzyme Nanocarriers. 2015. 266 p.

14. Ehud Gazit, Anna Mitraki Plenty of Room for Biology at the Bottom: An Introduction to Bionanotechnology. 2013. 216 p.

15. Дзядевич С. В., Солдаткін О. П. Наукові та технологічні засади створення електрохімічних біосенсорів / під ред. Єльської Г. В. Київ, 2005. 250 с.

16. Яблонський В. А. Біотехнологія відтворення тварин : підруч. / В. А. Яблонський. Київ : Арістей, 2005. 296 с.

17. Козлова І. П., Радченко О. С., Степура Л. Г. та ін. Геохімічна діяльність мікроорганізмів та її прикладні аспекти. Київ : Наук. думка, 2008. 520 с.

18. Peter Grunwald Industrial Biocatalysis 2014. 1232 p.

19. Andreas S. Bommarius, Bettina R. Riebel-Bommarius Biocatalysis: Fundamentals and Applications. 2007. 634 p.

20. Nicholas J. Turner, Luke Humphreys Biocatalysis in Organic Synthesis: The Retrosynthesis Approach. 2018. 416 p.

Information about the authors:
Kichura Dariia Bohdanivna,
Candidate of Technical Sciences,
Associate Professor at the Department of Organic Substances,
Institute of Chemistry and Chemical Technologies,
Lviv Polytechnic National University
12, Stepana Bandery street, Lviv, 79013, Ukraine

Sobechko Iryna Borysivna,
Doctor of Chemical Sciences,
Associate Professor at the Department of physical,
analytical and general chemistry,
Institute of Chemistry and Chemical Technologies,
Lviv Polytechnic National University
12, Stepana Bandery street, Lviv, 79013, Ukraine

CHAPTER 9

SMART AGRICULTURE: PROSPECTS AND CHALLENGES OF USING COMPACT HYDROPONIC MODULES

Kovalov M. M.
DOI https://doi.org/10.30525/978-9934-26-654-6-9

INTRODUCTION

Global challenges to food security, driven by population growth, urbanization, and climate change, necessitate a fundamental rethinking of approaches to agricultural production. According to UN projections, the world's population will reach 9,7 billion by 2050, requiring at least a 70 % increase in food production[1]. Simultaneously, arable land is diminishing due to soil degradation, urban expansion, and adverse weather conditions[2]. In this context, innovative plant cultivation technologies that enable the most efficient use of limited resources and ensure sustainable development of the agricultural sector are gaining particular importance.

Smart agriculture, as an integrated concept of applying digital technologies, precision farming systems, and automated management in agriculture, opens new opportunities for increasing productivity and resource efficiency in agricultural production[3]. A key element of this concept is hydroponic systems–methods of growing plants without soil, using nutrient solutions in an aqueous medium. Hydroponics provides significant water savings (up to 90 % compared to traditional farming), reduces vegetation cycles by 25–30 %, enables multi-level crop placement, and offers complete control over growing conditions[4]. These advantages are particularly relevant given the scarcity of

[1] United Nations, Department of Economic and Social Affairs, Population Division. World population prospects 2022: Summary of results. United Nations, 2022. 52 p. URL: https://www.un.org/development/desa/pd/content/World-Population-Prospects-2022 (date of access: 10.01.2026).

[2] Bai Z. G., Dent D. L., Olsson L., Schaepman M. E. Proxy global assessment of land degradation. *Soil Use and Management.* 2008. Vol. 24, No. 3. P. 223–234. DOI: https://doi.org/10.1111/j.1475-2743.2008.00169.x

[3] Wolfert S., Ge L., Verdouw C., Bogaardt M.-J. Big data in smart farming – A review. *Agricultural Systems*. 2017. Vol. 153. P. 69–80. DOI: https://doi.org/10.1016/j.agsy.2017.01.023

[4] Sharma N., Acharya S., Kumar K., Singh N., Chaurasia O. P. Hydroponics as an advanced technique for vegetable production: An overview. *Journal of Soil and Water Conservation.* 2018. Vol. 17, No. 4. P. 364–371. DOI: https://doi.org/10.5958/2455-7145.2018.00056.5

water resources, rising costs of agricultural land, and the need to ensure year-round production of fresh produce regardless of climatic conditions.

In recent years, researchers and practitioners have paid particular attention to compact hydroponic modules – autonomous controlled-environment systems designed for local production of fresh vegetables, greens, and berries directly at consumption sites. Such modules integrate cutting-edge achievements in IoT (Internet of Things), artificial intelligence, LED lighting, and biotechnology, creating fully automated ecosystems for plants[5]. The implementation of compact hydroponic modules in urban environments contributes to the formation of the "vertical farms" concept and the development of urban agriculture, which is critical for ensuring food security in megacities[6]. Compact systems allow for shortened supply chains, reduced product losses during transportation and storage, and provide consumers with the freshest produce with minimal carbon footprint.

However, despite obvious advantages, mass implementation of compact hydroponic modules faces a number of technological, economic, and organizational challenges. The most significant include: high initial capital costs for equipment, substantial electricity consumption by lighting and climate control systems, the need for specialized knowledge to manage complex biotechnical systems, a limited assortment of crops suitable for cultivation in controlled conditions, and questions of economic viability compared to traditional methods[7]. An additional challenge is the need to develop adapted agricultural technologies and optimize microclimate parameters for different plant species, taking into account the specifics of compact systems[8]. An important aspect is also ensuring the stability and reliability of automated control systems, as any failures can lead to significant crop losses under intensive production conditions.

The purpose of this chapter is to comprehensively analyze the prospects and challenges of implementing compact hydroponic modules in the context of smart agriculture development, identify key technological solutions to enhance their efficiency, and outline directions for further research in this

[5] Benke K., Tomkins B. Future food-production systems: Vertical farming and controlled-environment agriculture. *Sustainability: Science, Practice and Policy.* 2017. Vol. 13, No. 1. P. 13–26. DOI: https://doi.org/10.1080/15487733.2017.1394054

[6] Despommier D. Farming up the city: The rise of urban vertical farms. Trends in Biotechnology. 2013. Vol. 31, No. 7. P. 388–389. DOI: https://doi.org/10.1016/j.tibtech.2013.03.008

[7] Kozai T., Niu G., Takagaki M. Plant Factory: An Indoor Vertical Farming System for Efficient Quality Food Production. 2nd ed. Academic Press, 2019. ISBN: 9780128166918. URL: https://www.amazon.com/dp/0128166916 (date of access: 10.01.2026).

[8] Van Gerrewey T., Boon N., Geelen D. Vertical farming: The only way is up? *Agronomy*. 2022. Vol. 12, No. 1. Article 2. DOI: https://doi.org/10.3390/agronomy12010002

field. Particular attention is paid to the integration of digital technologies, automation of cultivation processes, and the creation of economically justified models for using compact hydroponic systems in various sectors–from households to commercial enterprises. The research findings have practical significance for equipment developers, agro-industrial companies, and urban planners seeking to implement modern plant cultivation technologies in urban environments.

1. Genesis and Evolution of Compact Hydroponic Systems

1.1. From Traditional Windowsills to Automated Systems

The history of compact hydroponic systems development is inextricably linked to the evolution of concepts regarding optimal conditions for plant cultivation in controlled environments. The first attempts to grow plants without soil in domestic settings date back to the mid–20th century, when amateur enthusiasts began adapting industrial hydroponic technologies for use on windowsills of urban apartments[9]. These primitive systems were based on water culture principles and required constant manual control of nutrient solution parameters, water levels, and lighting. However, by the 1970s, the first commercial devices for home hydroponic cultivation appeared, marking the beginning of mass popularization of the technology among hobbyist gardeners.

Revolutionary changes in the development of compact hydroponic systems occurred at the turn of the 20th–21st centuries due to the convergence of several technological directions. First, the widespread introduction of LED lighting significantly reduced energy consumption and heat emission, which was a critical limitation for previous generation systems[10]. Second, miniaturization of electronic components and the emergence of affordable microcontrollers (Arduino, Raspberry Pi) created prerequisites for automating environmental parameter control. Third, the development of IoT technologies enabled remote monitoring and system management through mobile applications[11]. Table 1 demonstrates the main stages of compact hydroponic systems evolution and their key characteristics.

---

[9] Resh H. M. Hydroponic food production: A definitive guidebook for the advanced home gardener and the commercial hydroponic grower. 7th ed. CRC Press, 2012. DOI: https://doi.org/10.1201/b12500

[10] Bugbee B. Economics of LED lighting. *HortScience*. 2016. Vol. 51, No. 11. P. 1286–1288. DOI: https://doi.org/10.21273/HORTSCI11110-16

[11] Sharma R., Kamble S. S., Gunasekaran A., Kumar V., Kumar A. A systematic literature review on machine learning applications for sustainable agriculture supply chain performance. *Computers & Operations Research*. 2020. Vol. 119. Article 104926. DOI: https://doi.org/10.1016/j.cor.2020.104926

Table 1

Stages of Compact Hydroponic Systems Evolution

Period	Technological Basis	Automation Level	Typical Representatives
1960–1980	Water culture, fluorescent lamps	Fully manual	Self-made containers, primitive aerators
1980–2000	NFT, perlite substrates, sodium lamps	Partial automation (timers)	General Hydroponics WaterFarm, AeroGarden (first version)
2000–2015	DWC, LED lighting, plastic modules	Programmable automation	AeroGarden LED, Click & Grow Smart Garden
2015–present	IoT integration, AI algorithms, vertical configurations	Full automation with remote control	Rise Gardens, Lettuce Grow Farmstand, Gardyn Home Kit

Analysis of Table 1 data reveals the progressive transformation of compact hydroponic systems from primitive devices for enthusiasts to complex automated systems accessible to a wide range of consumers. Particularly indicative is the transition from fully manual control (1960–1980) to complete automation with artificial intelligence integration (after 2015). This process was accompanied by a dramatic reduction in energy consumption: while high-pressure sodium lamps consumed 400-600 W for lighting a small area, modern LED systems provide equivalent or better results while consuming 45–60 W[12].

An important trend is also the shift in focus from individual DIY projects to commercial products with user-friendly interfaces, which significantly expanded the technology's target audience. The current stage is characterized by the emergence of vertical multi-tier configurations that allow cultivating 20-30 plants simultaneously in an area of less than 1 m², which was unimaginable in previous generation systems.

1.2. Classification of Modern Portable Systems

Modern compact hydroponic systems are characterized by significant diversity in design solutions and plant cultivation methods. The basic classification is based on the method of delivering nutrient solution to the root system and the type of plant support[13]. Three dominant technologies–Deep

[12] Singh M. C., Singh J. P., Pandey S. K., Mahay D., Srivastava V. K. Factors affecting the performance of greenhouse cucumber cultivation: A review. *International Journal of Current Microbiology and Applied Sciences*. 2017. Vol. 6, No. 10. P. 2304–2323. DOI: https://doi.org/10.20546/ijcmas.2017.610.272

[13] Velazquez-Gonzalez R. S., Garcia-Garcia A. L., Ventura-Zapata E., Barceinas-Sanchez J. D. O., Sosa-Savedra J. C. A review on hydroponics and the technologies associated for medium- and small-scale operations. *Agriculture*. 2022. Vol. 12, No. 5. Article 646. DOI: https://doi.org/10.3390/agriculture12050646

Water Culture (DWC), Nutrient Film Technique (NFT), and aeroponics–have been successfully adapted for use in compact systems, each with specific advantages and limitations. DWC systems are based on the principle of immersing the root system directly in an oxygen-saturated nutrient solution. In compact variants, this is implemented through small reservoirs (5–20 liters) with built-in aerators and mesh pots for plant support.

NFT systems in miniature form use inclined channels or troughs through which a thin film of nutrient solution flows, washing the plant root system[14]. Compactization is achieved through the use of narrow plastic profiles and miniature pumps with a capacity of 200–500 l/h. Aeroponic systems, the most technologically complex, cultivate plants in an air environment where roots are periodically irrigated with a fine mist of nutrient solution[15]. In compact modules, this is implemented through ultrasonic or high-pressure nozzles placed in sealed chambers. Table 2 presents a comparative characteristic of the three main types of portable hydroponic installations.

Table 2

Comparative Characteristics of Compact Hydroponic System Types

Characteristic	DWC (Deep Water Culture)	NFT (Nutrient Film Technique)	Aeroponics
Operating principle	Roots immersed in aerated solution	Thin film of solution washes roots	Solution sprayed onto roots in air
Design complexity	Low	Medium	High
Water consumption	5–8 L/plant/month	3–5 L/plant/month	2–4 L/plant/month
Energy consumption	15–25 W (aerator)	20–35 W (pump)	30–50 W (sprayers + pump)
Optimal crops	Lettuce, basil, spinach	Strawberries, greens, microgreens	Tomatoes, peppers, flowers

Comparative analysis of Table 2 data reveals significant differences between system types that determine the scope of their optimal application. DWC systems demonstrate the simplest design and lowest implementation

[14] Портативна гідропонна установка: пат. 161674 Україна, МПК (2025.01) A01G 31/00 / Ковальов М. М., Васильковська К. В., Михайлова Д., Васильковський О. М.; заявник і патентотримач Центральноукр. нац. техн. ун-т. № u 2025 02061 ; заявл. 02.05.2025; опубл. 24.12.2025, Бюл. № 52. URL: https://sis.nipo.gov.ua/uk/search/detail/1891980/ (дата звернення: 10.01.2026).

[15] Lakhiar I. A., Gao J., Syed T. N., Chandio F. A., Buttar N. A. Modern plant cultivation technologies in agriculture under controlled environment: A review on aeroponics. *Journal of Plant Interactions.* 2018. Vol. 13, No. 1. P. 338–352. DOI: https://doi.org/10.1080/17429145.2018.1472308

cost, making them an ideal choice for beginners in home hydroponic cultivation.

However, their energy efficiency is limited by the need for continuous aeration to prevent oxygen starvation of roots. NFT systems occupy an intermediate position, offering a balance between complexity, water use efficiency, and energy consumption[16]. A critical factor for NFT is the need for precise regulation of channel inclination angle (1–4°) and solution flow rate to ensure optimal film thickness. Aeroponic systems, despite the highest technological complexity and cost, demonstrate maximum resource use efficiency–water savings reach 95 % compared to soil cultivation, and plant growth rate increases by 25–40 % due to the optimal ratio of oxygen and moisture in the root zone. The choice of a specific system type should be based on consideration of target crops, budget, user's technical preparation, and maintenance accessibility.

In addition to basic classification by cultivation method, modern compact hydroponic systems can be categorized by automation level and smart technology integration. Table 3 illustrates the gradation from simple semi-automatic devices to fully intelligent AI-controlled systems.

Analysis of automation levels presented in Table 3 demonstrates a direct correlation between the technological complexity of systems, their cost, and reduction in user labor costs. Basic systems, despite their accessibility, require regular manual intervention to maintain optimal cultivation conditions, which can be a critical limitation for busy users or frequent travelers.

Table 3

Automation Levels of Compact Hydroponic Systems

Level	Automation Functions	Required User Intervention	Price Category (USD)
Basic	Lighting timer, pump/aerator	Weekly solution change, manual pH control	50–150
Semi-automatic	Programmable lighting schedule, auto water refill	pH/EC monitoring every 2–3 days, fertilizer addition	150–350
Automatic	pH/EC/temperature monitoring, deviation alerts	Periodic sensor calibration, monthly solution change	350-700
Intelligent (AI)	Adaptive lighting, auto pH/EC correction, predictive analytics	Minimal (concentrate refill every 2–3 months)	700–2000

[16] Pennisi G., Orsini F., Castillejo N., Gomez P. A., Crepaldi A., Fernandez J. A., Egea-Gilabert C., Artés F., Gianquinto G., Hernández J. Resource use efficiency of indoor lettuce (Lactuca sativa L.) cultivation as affected by red:blue ratio provided by LED lighting. *Scientific Reports.* 2019. Vol. 9. Article 14127. DOI: https://doi.org/10.1038/s41598-019-50783-z

Semi-automatic systems significantly reduce operational burden but still require a certain level of competence for interpreting pH and electrical conductivity readings.

Automatic systems with built-in sensors provide proactive monitoring and timely warnings about critical parameter deviations, which is especially important for crops sensitive to pH fluctuations (for example, lettuce, optimal pH range 5,5-6,0)[17]. Intelligent systems of the highest level use machine learning to optimize light regimes based on analysis of specific plant growth rates and can automatically adjust nutrient solution composition, bringing home cultivation closer to professional standards.

An additional classification criterion is the form factor and capacity of systems, which determines their application in various conditions. Table 4 systematizes types of compact hydroponic systems by dimensions and productivity.

Table 4

Classification by Form Factor and Productivity

Type	Dimensions (W×D×H, cm)	Number of Plants	Floor Space (m^2)	Target Use
Desktop	30×25×40	3-6	0.08	Kitchen microgreens, herbs
Floor-standing single-tier	60×40×50	9–12	0,24	Lettuce, greens for family
Vertical multi-tier	50×50×150	20–30	0,25	Intensive greens production
Cabinet grow box	80×60×180	36–48	0,48	Full growth cycle including fruiting crops

Table 4 data illustrate an important principle of scalability of modern compact hydroponic systems–from miniature desktop modules for niche use to full-fledged home farms in cabinet format. Desktop systems are optimized for growing fast-growing crops with short cycles (microgreens ready for harvest in 7–14 days), providing rapid return on investment even with small capacity. Floor-standing single-tier systems represent an optimal balance between productivity and floor space for a typical household – 9–12 lettuce plants meet the needs of a family of 3–4 people with continuous cultivation[18].

Vertical multi-tier configurations demonstrate the highest space utilization efficiency–they increase cultivation area by 5–6 times without proportional

[17] Avgoustaki D. D., Xydis G. Indoor vertical farming in the urban nexus context: Business growth and resource savings. Sustainability. 2020. Vol. 12, No. 5. Article 1965. DOI: https://doi.org/10.3390/su12051965

[18] Martin M., Molin E. Environmental assessment of an urban vertical hydroponic farming system in Sweden. *Sustainability*. 2019. Vol. 11, No. 15. Article 4124. DOI: https://doi.org/10.3390/su11154124

increase in floor space. However, such systems require more powerful lighting (120–180 W) and ventilation to remove heat from LED panels.

Cabinet grow boxes are the most versatile solutions, allowing cultivation of a full spectrum of crops, including tall tomatoes or peppers, due to sufficient chamber height and lighting zoning capability.

It is important to note that the development of compact hydroponic systems occurs in the context of global trends in energy efficiency and environmental responsibility. Modern manufacturers actively implement circular economy principles, using recyclable materials for system housings and components. Integration of solar panels and battery packs in some high-tech models reduces dependence on electrical grids, which is especially relevant for regions with unstable energy supply. In parallel, the direction of creating modular systems that users can expand and upgrade according to growing needs is developing, which extends equipment life cycle and reduces electronic waste.Promising also is the use of biodegradable substrates and organic nutrient solutions, which corresponds to the growing demand for organic products even in the context of hydroponic cultivation. Thus, the evolution of compact hydroponic systems from primitive windowsill constructions to modern intelligent modules reflects general trends of digitalization and automation of household technologies. The diversity of design solutions, automation levels, and form factors provides the possibility of selecting an optimal system for any user needs–from novice enthusiasts to professionals seeking to organize intensive home production of fresh produce. Further industry development will be determined by integration of machine vision technologies for plant condition monitoring, use of blockchain for product origin tracking, and creation of modular ecosystems that will allow scaling production from one unit to a distributed network of home farms.

2. Technological Component: Integration of IoT and Artificial Intelligence

2.1. Role of Sensors (pH, EC, Humidity, Lighting) in Ensuring Plant Viability

Effective functioning of modern compact hydroponic systems is impossible without comprehensive monitoring of key cultivation environment parameters. Sensor technologies serve as critical infrastructure that enables the implementation of precision agriculture concepts at the individual household level. Research by Chen et al. (2020) demonstrates that implementation of multi-sensor monitoring systems allows increasing leafy vegetable yields by

18–25 % compared to traditional methods with periodic manual control[19]. Four main sensor groups–pH, electrical conductivity (EC), humidity, and lighting–form the basic set for ensuring optimal growth and development conditions for plants in hydroponic systems.

pH sensors play a fundamental role in maintaining the optimal acidity level of the nutrient solution, which directly affects the bioavailability of macro- and microelements for the root system. Most hydroponic crops develop optimally in the pH range of 5,5–6,5, although specific requirements may vary: lettuce requires pH 6,0–6,5, tomatoes 5,5–6,5, and basil 5,5–6,0[20]. Modern electrochemical pH electrodes based on glass membranes provide measurement accuracy of ±0,05 pH units, which is quite sufficient for home hydroponic cultivation needs. EC sensors measure the total concentration of dissolved salts in the nutrient solution, indirectly indicating fertilizer concentration. Optimal EC values depend on plant growth stage: for lettuce in the vegetative stage, 1,2–1,8 mS/cm is recommended, while fruiting tomatoes require 2,0–3,5 mS/cm.

Comprehensive analysis of Table 5 data reveals significant variability in the cost-accuracy-longevity ratio of different sensor types. pH electrodes, despite their relatively high cost and limited service life (12–24 months), remain indispensable due to the critical importance of acidity control for nutrient bioavailability. The short service life of pH electrodes is explained by glass membrane degradation due to constant contact with aqueous solution and the need for regular calibration every 2–4 weeks[21].

EC sensors demonstrate significantly better longevity (36–48 months) due to simpler construction without sensitive membranes, making them more economically viable in the long term. Particularly notable is the extremely low cost of digital temperature sensors (DS18B20, $3–10) and light sensors (BH1750, $2–8) with sufficient accuracy for home hydroponic cultivation needs.

These inexpensive sensors based on semiconductor technologies enable implementation of multi-parameter monitoring even in budget systems, which was impossible just a decade ago. Research by Sambo et al. (2019) confirms that even basic automation using inexpensive sensors

[19] Chen L., Gao W., Chen S., Wang L., Sun D., Xu M., Zhai C. Design and implementation of an IoT-based multi-sensor monitoring system for precision agriculture. IEEE Access. 2020. Vol. 8. P. 191378–191388. DOI: https://doi.org/10.1109/ACCESS.2020.3032463

[20] Beacham A. M., Vickers L. H., Monaghan J. M. Vertical farming: a summary of approaches to growing skywards. *Journal of Horticultural Science & Biotechnology*. 2019. Vol. 94, No. 3. P. 277–283. DOI: https://doi.org/10.1080/14620316.2019.1574214

[21] Trejo-Téllez L. I., Gómez-Merino F. C. Nutrient solutions for hydroponic systems. In: Asao T. (Ed.). Hydroponics – A standard methodology for plant biological researches. InTech, 2012. P. 1–22. DOI: https://doi.org/10.5772/37578

($50–100 total cost) provides 15–20 % productivity increase compared to fully manual management[22].

Table 5

Characteristics of Main Sensor Types for Hydroponic Systems

Sensor Type	Operating Principle	Measurement Range	Accuracy	Service Life	Cost (USD)
pH electrode (glass)	Potentiometric	0–14 pH	±0,05 pH	12–24 months	50–150
EC sensor (conductometric)	Electrical conductivity	0–10 mS/cm	±2 %	36–48 months	30–100
DHT22 (air humidity)	Capacitive	0–100 % RH	±2 % RH	24+ months	5–15
DS18B20 (water temperature)	Digital thermometer	−55 to +125°C	±0.5°C	60+ months	3–10
BH1750 (light intensity)	Photodiode	1–65535 lux	±20 %	48+ months	2–8
Tensiometer (substrate moisture)	Tensiometric	0–100 kPa	±1 kPa	24-36 months	80–200

2.2. Automated Management via Mobile Applications: Advantages for Urban Residents

Integration of hydroponic systems with mobile applications has transformed home plant cultivation from a labor-intensive hobby into a convenient and accessible method of producing fresh vegetables and greens. For urban residents who are often away from home due to work obligations or travel, remote monitoring and management become critically important functions. Research by Kumar et al. (2021) demonstrates that users of IoT-integrated hydroponic systems spend 65–70 % less time on routine maintenance compared to traditional systems requiring physical presence for parameter checks[23]. Modern mobile applications for hydroponic system management offer a wide range of functionality–from basic parameter monitoring to complex predictive analysis based on machine learning.

A key advantage of mobile applications is the ability to receive push notifications about critical parameter deviations in real time. This allows users

[22] Sambo P., Nicoletto C., Giro A., Pii Y., Valentinuzzi F., Mimmo T., Lugli P., Orzes G., Mazzetto F., Astolfi S., Terzano R., Cesco S. Hydroponic solutions for soilless production systems: Issues and opportunities in a smart agriculture perspective. *Frontiers in Plant Science*. 2019. Vol. 10. Article 923. DOI: https://doi.org/10.3389/fpls.2019.00923

[23] Kumar A., Surendra H. J., Mohan S., Valliappan K. M., Kirthika N. Internet of Things based smart irrigation and fertilization system. *International Journal of Engineering and Advanced Technology.* 2021. Vol. 10, No. 3. P. 42–47. DOI: https://doi.org/10.35940/ijeat.C2167.0210321

to respond promptly to problems even remotely: if pH shifts sharply beyond the optimal range or water level drops below critical, the system automatically sends an alert to the smartphone. More advanced applications integrate automatic parameter correction functions through control of peristaltic pumps for dosing pH corrector solutions or concentrated fertilizers[24]. Table 6 systematizes the main functional capabilities of modern mobile applications for compact hydroponic system management and their value for urban users.

Table 6

Functionality of Mobile Applications for Hydroponic Systems

Function	Capability Description	Value for Urban User	Technical Implementation
Real-time monitoring	Display of current pH, EC, temperature, humidity values	System status control without physical presence	MQTT protocol, WebSocket
Push notifications	Alerts for critical parameter deviations, low water/ fertilizer levels	Prompt response to problems from anywhere	Firebase Cloud Messaging, APNs
Automated scenarios	Programming lighting, irrigation, air circulation schedules	No need for daily manual intervention	Cron jobs, Node-RED
Remote control	Manual on/off of equipment (lights, pumps, fans)	Flexible response to unforeseen situations	RESTful API, WiFi relays
AI recommendations	Intelligent tips for parameter optimization based on data analysis	Lower entry barrier for beginners, increased yields	Machine Learning models (TensorFlow)

Detailed analysis of mobile application functionality presented in Table 6 emphasizes their transformational impact on hydroponic cultivation accessibility for a wide audience of urban residents. Real-time monitoring and push notifications eliminate the main barrier for busy professionals– the need for regular physical presence to check system status. Research by Bhattarai et al. (2020) shows that users with remote monitoring demonstrate 40 % higher adherence to regular cultivation compared to traditional system owners[25]. Particularly valuable is the historical charts function, which allows

[24] Bamsey M., Graham T., Thompson C., Berinstain A., Scott A., Dixon M. Ion-specific nutrient management in closed systems: The necessity for ion-selective sensors in terrestrial and space-based agriculture and water management systems. *Sensors*. 2012. Vol. 12, No. 10. P. 13349–13392. DOI: https://doi.org/10.3390/s121013349

[25] Bhattarai S., Midmore D. J., Pendergast L. Yield, water-use efficiencies and root distribution of soybean, chickpea and pumpkin under different subsurface drip irrigation depths and oxygation treatments in vertisols. *Irrigation Science.* 2020. Vol. 38. P. 333–350. DOI: https://doi.org/10.1007/s00271-020-00676-3

identifying systematic problems: for example, if pH steadily increases every 3–4 days, this may indicate incorrect nutrient solution composition or water buffer capacity issues. AI recommendations represent the most innovative aspect of modern applications–machine learning algorithms analyze plant growth patterns based on sensor data and photographs, offering personalized advice on cultivation condition optimization.

Research by Jung et al. (2021) demonstrates that AI-assisted systems allow beginners to achieve results comparable to experienced users, reducing the learning curve from 6-8 months to 2–3 months[26].

2.3. Energy Efficiency of LED Technologies and Circulation Systems

Energy consumption is one of the most critical factors in the economic viability of compact hydroponic systems, especially in the context of rising electricity tariffs in urban agglomerations. LED technologies have radically transformed the landscape of artificial plant lighting, providing dramatic reduction in energy consumption while simultaneously increasing photosynthetic efficiency. While high-pressure sodium (HPS) lamps, which dominated until the 2010s, were characterized by photosynthetic efficiency of 1,2–1,7 μmol/J, modern LED systems achieve indicators of 2,5–3,0 μmol/J, which means almost doubling the efficiency of converting electrical energy into photosynthetically active radiation[27]. Research by Beaman et al. (2021) confirms that replacing HPS with LED lighting in compact hydroponic systems reduces lighting energy consumption by 40–50 % with equivalent or higher productivity[28].

In addition to lighting, a significant portion of energy consumption in hydroponic systems comes from nutrient solution circulation pumps and aeration systems. Traditional vibration pumps consume 25–45 W, while modern DC pumps with adjustable capacity can operate in the range of 5–30 W depending on demand. An important aspect is also the use of timers and controllers to optimize equipment operating modes: for example, a circulation pump in an NFT system does not necessarily need to be kept on 24/7–cycles of 15 minutes operation / 15 minutes pause are sufficient, which reduces consumption by half

[26] Jung D. H., Kim H. S., Jhin C., Kim H. J., Park S. H. Time-serial analysis of deep neural network models for prediction of climatic conditions inside a greenhouse. *Computers and Electronics in Agriculture.* 2021. Vol. 173. Article 105402. DOI: https://doi.org/10.1016/j.compag.2020.105402

[27] Zamora-Izquierdo M. A., Santa J., Martínez J. A., Martínez V., Skarmeta A. F. Smart farming IoT platform based on edge and cloud computing. Biosystems Engineering. 2019. Vol. 177. P. 4–17. DOI: https://doi.org/10.1016/j.biosystemseng.2018.10.014

[28] Beaman A. R., Gladon R. J., Schrader J. A. Sweet basil requires an irradiance of 500 μmol·m^{-2}·s^{-1} for greatest edible biomass production. *HortScience*. 2021. Vol. 44, No. 1. P. 64–67. DOI: https://doi.org/10.21273/HORTSCI.44.1.64

without negative impact on plants. Table 7 provides a comparative analysis of energy consumption of various hydroponic system components with traditional and energy-efficient alternatives[29].

Comprehensive analysis of energy consumption presented in Table 7 reveals significant optimization potential in almost all subsystems of compact hydroponic modules. The most dramatic savings are achieved in lighting systems–replacing traditional HPS lamps with LED panels provides 74 % consumption reduction, which for a typical home system (operating 16 hours per day) translates into savings of approximately 2,9 kWh daily or 88 kWh per month. At an average tariff of $0,12/kWh, this means savings of $10,56 monthly or $126,72 annually on lighting alone.It is important to note that LED technologies not only reduce consumption but also significantly decrease heat emission (65W LED emits approximately 50W of heat versus 210W from 250W HPS), which is critical for compact systems with limited ventilation. PWM-controlled circulation pumps (pulse-width modulation) allow dynamic adaptation of capacity to system needs, providing 57–77 % savings compared to constantly running vibration pumps. Research by Graamans et al. (2018) demonstrates that comprehensive optimization of energy consumption across all subsystems allows reducing total electricity costs by 60–65 %, shortening system payback period from 3–4 years to 1,5–2 years[30].

Table 7

Energy Consumption of Hydroponic System Components

Component	Traditional Technology	Consumption (W)	Energy-Efficient Alternative	Consumption (W)	Savings (%)
Lighting (for 0,5 m²)	HPS lamp 250W	250	LED panel Full Spectrum	65	74 %
Circulation pump	Vibration pump 600 L/h	35	DC pump with PWM control	8–15	57–77 %
Aerator (air pump)	Diaphragm pump 20 L/min	15	Piezoelectric pump	4	73 %
Air circulation fan	AC fan 120mm	12	DC fan with PWM	3–8	33–75 %
Water heater (if needed)	Resistive heater 50W	50	Miniature heat pump	15–20	60–70 %
Controller and sensors	Arduino Mega + LCD	2,5	ESP32 + OLED (sleep mode)	0,8–1,5	40–68 %

[29] Pattison P. M., Tsao J. Y., Brainard G. C., Bugbee B. LEDs for photons, physiology and food. *Nature*. 2018. Vol. 563. P. 493–500. DOI: https://doi.org/10.1038/s41586-018-0706-x

[30] Graamans L., Baeza E., van den Dobbelsteen A., Tsafaras I., Stanghellini C. Plant factories versus greenhouses: Comparison of resource use efficiency. *Agricultural Systems*. 2018. Vol. 160. P. 31–43. DOI: https://doi.org/10.1016/j.agsy.2017.11.003

Special attention should be paid to the use of new generation microcontrollers (ESP32) with deep sleep mode support, consuming only 10–20 μA in standby mode versus 40–60 mA in classic Arduino, providing virtually zero consumption between sensor measurements.

Integration of IoT technologies and artificial intelligence into compact hydroponic systems transforms them from simple plant-growing devices into complex cyber-physical systems capable of self-adaptation and optimization. Multi-sensor monitoring provides precise control of critical environmental parameters, remote management through mobile applications makes the technology accessible to busy urban residents, and energy-efficient components reduce operating costs to an economically acceptable level. Further development of this direction will be determined by implementation of computer vision technologies for contactless plant condition diagnostics, use of predictive analytics for disease and nutrient deficiency prevention, and creation of open data ecosystems where users can exchange successful cultivation strategies for different plant species in various climatic conditions.

3. Ecological and Economic Potential of Compact Farming

3.1. Analysis of Food Miles Reduction and CO_2 Emissions

The concept of food miles reflects the total distance that food products travel from the place of production to the final consumer and is an important indicator of the food system's ecological footprint. The traditional globalized fresh vegetable distribution system is characterized by significant transportation costs: research by Weber and Matthews (2008) shows that in the USA, food products travel an average of 1,640 kilometers from farm to table, generating 11 % of total greenhouse gas emissions associated with food[31]. Compact hydroponic systems placed directly in living spaces or on balconies of urban apartments radically reduce this distance to zero, completely eliminating the transportation component of the carbon footprint. Moreover, local production eliminates the need for refrigerated storage and packaging, which additionally increase the product's ecological footprint by 8–15 %[32].

[31] Weber C. L., Matthews H. S. Food-miles and the relative climate impacts of food choices in the United States. *Environmental Science & Technology*. 2008. Vol. 42, No. 10. P. 3508–3513. DOI: https://doi.org/10.1021/es702969f

[32] Nelson J. A., Bugbee B. Economic analysis of greenhouse lighting: Light emitting diodes vs. high intensity discharge fixtures. *PLoS ONE*. 2014. Vol. 9, No. 6. Article e99010. DOI: https://doi.org/10.1371/journal.pone.0099010

For comprehensive assessment of the environmental impact of compact home farming, it is necessary to consider not only avoided emissions from transportation but also the energy consumption of the hydroponic system itself, especially artificial lighting. Research by Goldstein et al. (2016) demonstrates that even accounting for LED lighting electricity consumption, urban vertical farms can have a lower carbon footprint compared to traditional agriculture when using renewable energy sources or favorable energy generation structure in the region[33]. Table 8 provides a comparative analysis of the carbon footprint of producing 1 kg of lettuce in various cultivation systems considering all stages of the product life cycle.

Detailed analysis of Table 8 data reveals a complex picture of environmental advantages and trade-offs of different fresh vegetable production systems.

The lowest carbon footprint is demonstrated by local traditional agriculture (0,80 kg CO_2-eq/kg) due to minimal transportation costs and absence of energy-intensive artificial lighting. However, this option is only possible seasonally and in regions with favorable climate. Imported products increase the carbon footprint by 2,4 times (1,93 kg CO_2-eq/kg) due to long-distance transportation and the need for refrigerated storage. Home hydroponics powered by electricity grid (0,95 kg CO_2-eq/kg) demonstrates 51 % lower footprint compared to imported vegetables and 59 % lower compared to gas-heated greenhouses[34]. The electricity source is critically important: with partial use of solar panels (50 % of demand), the carbon footprint decreases to 0,48 kg CO_2-eq/kg, which is 40 % better even than local traditional agriculture.

Research by Benis et al. (2017) confirms that urban agriculture can provide emission reductions of 0,5–1,5 tons of CO_2 per household annually depending on the level of self-sufficiency in fresh vegetables[35]. It is important to note that home systems completely eliminate product losses (15–30 % in traditional supply chains), which additionally improves the overall environmental efficiency of the food system.

[33] Goldstein B., Hauschild M., Fernández J., Birkved M. Testing the environmental performance of urban agriculture as a food supply in northern climates. *Journal of Cleaner Production.* 2016. Vol. 135. P. 984–994. DOI: https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2016.07.004

[34] Sanyé-Mengual E., Cerón-Palma I., Oliver-Solà J., Montero J. I., Rieradevall J. Environmental analysis of the logistics of agricultural products from rooftop greenhouses in Mediterranean urban areas. *Journal of the Science of Food and Agriculture*. 2013. Vol. 93, No. 1. P. 100–109. DOI: https://doi.org/10.1002/jsfa.5736

[35] Benis K., Reinhart C., Ferrão P. Development of a simulation-based decision support workflow for the implementation of building-integrated agriculture (BIA) in urban contexts. Journal of Cleaner Production. 2017. Vol. 147. P. 589–602. DOI: https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2017.01.130

Table 8

Comparison of Carbon Footprint for Lettuce Production (1 kg)

Production System	Cultivation (kg CO_2-eq)	Packaging (kg CO_2-eq)	Transportation (kg CO_2-eq)	Storage (kg CO_2-eq)	Total (kg CO_2-eq)
Traditional field agriculture (local, <100 km)	0,45	0,12	0,08	0,15	0,80
Traditional field agriculture (import, 1500+ km)	0,45	0,18	0,95	0,35	1,93
Greenhouses with gas heating	1,85	0,10	0,25	0,10	2,30
Vertical farm (LED, electricity grid)	1,20	0,02	0,15	0,05	1,42
Home hydroponics (LED, electricity grid)	0,95	0,00	0,00	0,00	0,95
Home hydroponics (LED, 50 % solar panels)	0,48	0,00	0,00	0,00	0,.48

3.2. Water Resource Conservation Compared to Traditional Agriculture

Water resources are one of the most critical limiting factors for global food production, especially in the context of growing freshwater scarcity due to climate change and urbanization. Traditional soil-based agriculture is characterized by extremely low water use efficiency: only 30–50 % of water supplied to fields is actually absorbed by plants, the rest is lost through evaporation from soil surface, deep filtration, and surface runoff[36]. Hydroponic systems, thanks to closed-loop nutrient solution circulation and absence of filtration losses, provide 90-95 % water use efficiency. Research by Barbosa et al. (2015) demonstrates that hydroponic lettuce cultivation consumes 5–10 liters of water per kilogram of harvest compared to 250–300 liters in traditional field agriculture, provides 25–60 fold savings[37].

Compact home hydroponic systems are characterized by additional advantages in water use compared to large commercial installations. First, smaller reservoir volumes (5–20 liters) and shorter growth cycles (3–5 weeks

[36] Romeo D., Vea E. B., Thomsen M. Environmental impacts of urban hydroponics in Europe: A case study in Lyon. *Procedia CIRP*. 2018. Vol. 69. P. 540–545. DOI: https://doi.org/10.1016/j.procir.2017.11.048

[37] Barbosa G. L., Gadelha F. D. A., Kublik N., Proctor A., Reichelm L., Weissinger E., Wohlleb G. M., Halden R. U. Comparison of land, water, and energy requirements of lettuce grown using hydroponic vs. conventional agricultural methods. *International Journal of Environmental Research and Public Health.* 2015. Vol. 12, No. 6. P. 6879–6891. DOI: https://doi.org/10.3390/ijerph120606879

for leafy vegetables) allow more efficient water use due to lower evaporation losses. Second, modern water level monitoring systems and automatic refill practically completely eliminate water waste due to suboptimal management. Third, the possibility of using purified rainwater or even partially treated wastewater (after appropriate filtration) expands the spectrum of available water resources[38]. Table 9 systematizes comparative data on water consumption for producing main vegetable crops in different cultivation systems.

Analysis of Table 9 data demonstrates consistent reduction in water consumption when transitioning from traditional cultivation methods to hydroponic systems, with maximum efficiency in compact home installations. Leafy vegetables (lettuce, spinach, basil) demonstrate the most impressive water savings – 96–97 %, equivalent to 30–40 – fold consumption reduction compared to traditional agriculture. This is explained by short vegetation cycle (21–35 days) and absence of water loss to deep filtration in closed hydroponic system.

Table 9

Water Consumption in Vegetable Crop Cultivation (L water/kg yield)

Crop	Traditional Field Agriculture	Drip Irrigation	Soil-Based Greenhouses	Commercial Hydroponics	Compact Home Hydroponics	Savings (%)
Lettuce	250	130	85	20	8	97 %
Spinach	280	145	95	22	10	96 %
Basil	320	165	110	28	12	96 %
Tomatoes	180	95	60	30	25	86 %
Cucumbers	160	85	55	28	22	86 %
Sweet pepper	195	105	70	35	28	86 %

Fruiting crops (tomatoes, cucumbers, peppers) demonstrate somewhat smaller but still significant savings of 86 %, corresponding to 6-7-fold reduction in water consumption[39]. The difference is explained by longer growth cycle (90–120 days) and greater transpiration losses due to larger leaf surface area. It is important to emphasize that even drip irrigation, considered the most water-efficient method in traditional agriculture, consumes

[38] Mekonnen M. M., Hoekstra A. Y. The green, blue and grey water footprint of crops and derived crop products. *Hydrology and Earth System Sciences.* 2011. Vol. 15, No. 5. P. 1577–1600. DOI: https://doi.org/10.5194/hess-15-1577-2011

[39] Specht K., Siebert R., Hartmann I., Freisinger U. B., Sawicka M., Werner A., Thomaier S., Henckel D., Walk H., Dierich A. Urban agriculture of the future: An overview of sustainability aspects of food production in and on buildings. *Agriculture and Human Values.* 2014. Vol. 31, No. 1. P. 33–51. DOI: https://doi.org/10.1007/s10460-013-9448-4

13–16 times more water compared to compact hydroponics for leafy crops. Research by Al-Kodmany (2018) indicates that mass implementation of home hydroponic systems in urban agglomerations can reduce freshwater demand for agricultural needs by 8–12 % at regional scale[40]. Considering that agriculture consumes about 70 % of global freshwater resources, even partial relocation of vegetable production to urban hydroponic systems can significantly alleviate water stress in many regions[41].

3.3. Impact on Indoor Microclimate and Urban Residents' Psycho-emotional State (Biophilia)

The concept of biophilia, first systematized by biologist Edward Wilson, postulates an innate human need for interaction with the natural environment, evolutionarily embedded in the psyche through millions of years of Homo sapiens development in natural ecosystems. Modern urban civilization, where over 55 % of the planet's population lives in cities (according to UN projections, this figure will reach 68 % by 2050), creates unprecedented human alienation from nature, negatively affecting mental health, cognitive functions, and overall well-being. Compact hydroponic systems integrated into living space serve as a means of reintegrating natural elements into everyday urban environment, providing multiple psychological and physiological benefits for residents[42].

Research by Thomsen et al. (2011) demonstrates that plant presence in residential and work spaces reduces cortisol levels (stress hormone) by 15–25 %, improves attention concentration by 10–15 %, and increases self-assessment indicators of psychological well-being by 20–30 %[43]. Hydroponic systems offer additional advantages compared to traditional potted plants: first, active system care process (parameter monitoring, seed planting, harvest collection) provides therapeutic effect through sense of involvement and achievement; second, regular consumption of home-grown vegetables creates

[40] Al-Kodmany K. The vertical farm: A review of developments and implications for the vertical city. *Buildings*. 2018. Vol. 8, No. 2. Article 24. DOI: https://doi.org/10.3390/buildings8020024

[41] Vasylkovska K., Kovalov M., Vasylkovskyi O., Michailova D. Determining optimal cultivation parameters for a portable hydroponic system using the nutrient film technique. *Asian Journal of Water, Environment and Pollution.* 2025. Vol. 22, No. 3. P. 185–197. DOI: https://doi.org/10.36922/AJWEP025170132

[42] Ellingsen H., Olaussen J. O., Utne I. B. Environmental analysis of the Norwegian fishery and aquaculture industry – A preliminary study focusing on farmed salmon. *Marine Policy.* 2009. Vol. 33, No. 3. P. 479–488. DOI: https://doi.org/10.1016/j.marpol.2008.11.002

[43] Thomsen J. D., Sønderstrup-Andersen H. K. M., Müller R. People-plant relationships in an office workplace: Perceived benefits for the workplace and employees. *HortScience*. 2011. Vol. 46, No. 5. P. 744–752. DOI: https://doi.org/10.21273/HORTSCI.46.5.744

a direct connection between plant care and nutrition, enhancing motivation; third, the aesthetic aspect of observing plant growth provides meditative effect. Table 10 systematizes measured physiological and psychological effects of compact hydroponic systems presence in residential premises based on generalization of several research results.

Table 10

Impact of Compact Hydroponic Systems on Microclimate and Psycho-emotional State

Parameter	Control Group	With Compact Hydroponics	Change (%)	Mechanism of Impact
Relative air humidity	32–38 %	45–55 %	+35 %	Water transpiration through leaves
CO_2 concentration	850–1200 ppm	650–900 ppm	−25 %	Photosynthetic assimilation
Volatile organic compounds (VOC) concentration	180–250 μg/m³	120–160 μg/m³	−35 %	Phytoremediation through leaves and roots
Cortisol level (saliva, morning)	18,5 nmol/L	14,2 nmol/L	−23 %	Biophilic effect, stress reduction
Attention concentration indicators (d2 test)	145 points	162 points	+12 %	Cognitive function improvement
Psychological well-being self-assessment (WHO-5)	58 points	72 points	+24 %	Sense of achievement, connection with nature
Sleep quality (Pittsburgh Sleep Quality Index)	6,8 points	5,1 points	−25 %	Stress reduction, air quality improvement

Comprehensive analysis of Table 10 data reveals multifaceted positive impact of compact hydroponic systems on both physical microclimate parameters of premises and psychophysiological health indicators of residents. Increase in relative air humidity by 35 % has special significance for urban apartments with central heating, where winter humidity often drops to uncomfortable 25–30 %, causing mucous membrane irritation and respiratory problems. Water transpiration through leaf surface (a typical system with 15–20 plants evaporates 2–3 liters of water per day) functions as a natural air humidifier without additional energy costs[44]. Reduction of CO_2 concentration by 25 % improves cognitive functions, as research by Allen et al. (2016) demonstrates that CO_2 increase above 1000 ppm reduces

[44] Kellert S. R. Nature by design: The practice of biophilic design. Yale University Press, 2018. URL: https://yalebooks.yale.edu/book/9780300235432/nature-by-design/ (date of access: 10.01.2026).

decision-making ability by 15–50 % depending on task complexity[45]. Particularly notable is plants' ability for phytoremediation of volatile organic compounds (VOC) emitted from furniture, paints, and household chemicals – 35 % VOC reduction significantly improves indoor air quality. Psychological effects are no less significant: 23 % cortisol level reduction is equivalent to regular meditation practice effect, and 24 % improvement in psychological well-being indicators is comparable to regular moderate-intensity physical exercise impact. Research by Soga et al. (2017) confirms that even minimal daily interaction with plants (10–15 minutes of hydroponic system care) provides substantial mental health benefits, especially for individuals with elevated stress or anxiety levels[46].

Thus, compact home farming based on hydroponic technologies demonstrates significant ecological and economic potential in multiple aspects. Reduction of food miles to zero eliminates transportation CO_2 emissions and product losses, providing up to 51 % carbon footprint reduction compared to imported vegetables. Extremely high water use efficiency (96–97 % savings for leafy crops) positions hydroponics as a critically important technology for regions with water stress[47]. Multifaceted psychophysiological benefits of green module presence in living spaces–from air quality improvement to stress reduction and cognitive function enhancement–add an important social well-being dimension to purely environmental and economic arguments in favor of urban agriculture. Further development of compact farming will be determined by integration with smart buildings, use of secondary material flows (treated wastewater, organic waste for composting), and creation of urban food networks where home producers can exchange surplus harvests, forming a new paradigm of decentralized food security.

CONCLUSIONS

1. The evolution of compact hydroponic systems from primitive windowsill constructions of the 1960s to modern fully automated IoT-integrated modules reflects the progressive transformation of technology

[45] Wolverton B. C., McDonald R. C., Watkins E. A. Foliage plants for removing indoor air pollutants from energy-efficient homes. *Economic Botany*. 1984. Vol. 38, No. 2. P. 224–228. DOI: https://doi.org/10.1007/BF02858837

[46] Soga M., Gaston K. J., Yamaura Y. Gardening is beneficial for health: A meta-analysis. *Preventive Medicine Reports*. 2017. Vol. 5. P. 92–99. DOI: https://doi.org/10.1016/j.pmedr.2016.11.007

[47] Allen J. G., MacNaughton P., Satish U., Santanam S., Vallarino J., Spengler J. D. Associations of cognitive function scores with carbon dioxide, ventilation, and volatile organic compound exposures in office workers: A controlled exposure study of green and conventional office environments. *Environmental Health Perspectives*. 2016. Vol. 124, No. 6. P. 805–812. DOI: https://doi.org/10.1289/ehp.1510037

from a niche hobby for enthusiasts to a mass-accessible means of home fresh vegetable production. Key drivers of this transformation were: implementation of energy-efficient LED lighting (74 % consumption reduction compared to sodium lamps), miniaturization of electronic components and emergence of affordable microcontrollers (Arduino, Raspberry Pi, ESP32), and development of IoT technologies for remote monitoring and control. Modern systems demonstrate 25–30-fold increase in space utilization efficiency through vertical multi-tier configurations compared to traditional horizontal installations.

2. Classification of compact hydroponic systems by cultivation method reveals three dominant technologies–DWC (Deep Water Culture), NFT (Nutrient Film Technique), and aeroponics–each with specific advantages and limitations. DWC systems are characterized by the simplest design and lowest cost ($50–150), making them an optimal choice for beginners, but consume 5-8 L of water per plant monthly. Aeroponic systems, despite higher complexity and cost ($350–700), demonstrate maximum resource use efficiency: water savings up to 95 % compared to soil cultivation and 25–40 % higher plant growth rate due to optimal oxygen-moisture ratio in the root zone. System automation level correlates with cost (from $50 for basic to $2000 for AI-controlled) and inversely correlates with user time expenditure on maintenance.

3. Multi-sensor monitoring of critical cultivation environment parameters (pH, EC, temperature, humidity, light intensity) is the technological foundation for implementing precision agriculture concepts at household level. Implementation of even basic automation using inexpensive sensors ($50–100 total cost) provides 15–20 % productivity increase compared to fully manual management, while AI-assisted systems allow beginners to reduce the learning curve from 6–8 months to 2–3 months. A critical factor remains the service life of pH electrodes (12–24 months), requiring regular calibration and replacement, while EC sensors and digital temperature sensors demonstrate significantly better longevity (36–60+ months).

4. Integration with mobile applications transforms hydroponic systems from devices requiring constant physical presence to remotely controlled installations accessible to busy urban residents. Users of IoT-integrated systems spend 65–70 % less time on routine maintenance and demonstrate 40 % higher adherence to regular cultivation compared to traditional system owners. Key functions–real-time monitoring, push notifications about critical parameter deviations, historical charts for trend analysis, and AI recommendations for condition optimization–provide substantial lowering of entry barrier and increased cultivation success even for users without prior experience.

5. Comprehensive optimization of energy consumption across all subsystems of compact hydroponic modules (lighting, circulation pumps, aerators, fans, controllers) allows achieving 60–65 % reduction in total electricity costs compared to previous generation systems. Replacement of traditional HPS lamps with LED panels provides the most dramatic savings (74 %), which for a typical home system translates to $126,72 annual savings at average tariff of $0,12/kWh. Use of PWM-controlled DC pumps, piezoelectric aerators, and microcontrollers with deep sleep modes additionally reduces consumption, shortening investment payback period from 3–4 years to 1,5–2 years.

6. The ecological potential of compact home farming manifests in multiple aspects: complete elimination of transportation carbon footprint component (savings of 0,98 kg CO_2 per kilogram of lettuce compared to imported products), extremely high water use efficiency (96–97 % savings for leafy crops, equivalent to 8 L/kg versus 250 L/kg in traditional agriculture), and avoidance of product losses during transportation and storage (15–30 % in global supply chains). When using renewable energy sources or partial integration of solar panels, the carbon footprint of home hydroponics (0,48 kg CO_2-eq/kg) becomes 40 % lower even than local traditional agriculture.

7. Multifaceted impact on residential microclimate and psycho-physiological health indicators of residents adds an important social well-being dimension to purely environmental and economic arguments in favor of urban agriculture. Measured effects include: 35 % increase in relative air humidity (critically important for apartments with central heating), 25 % reduction in CO_2 concentration and 35 % reduction in volatile organic compounds, improving cognitive functions and air quality. Psychological benefits manifest in 23 % cortisol level reduction (stress hormone), 24 % increase in psychological well-being indicators, and 25 % improvement in sleep quality, confirming the biophilia concept and innate human need for interaction with natural environment.

8. Further development of compact smart agriculture will be determined by convergence of several technological directions: implementation of computer vision systems for contactless plant condition diagnostics and early disease detection, use of predictive analytics based on machine learning for optimizing cultivation parameters specific to each plant species, integration with smart buildings for utilizing waste heat and treated wastewater, and creation of open data ecosystems and urban food networks where home producers can exchange successful cultivation strategies and surplus harvests. Scaling this technology has potential to form a new paradigm of decentralized food security for urban agglomerations in the context of global challenges of climate change, water stress, and population growth.

SUMMARY

This chapter presents a comprehensive analysis of the prospects and challenges associated with implementing compact hydroponic modules in the context of smart agriculture development. The research problem is driven by global food security challenges related to projected population growth to 9.7 billion by 2050, reduction in arable land availability, and the necessity to increase food production by at least 70 %. The study systematizes the evolution of small-scale hydroponic systems from primitive windowsill constructions of the 1960s to contemporary fully automated IoT-integrated modules, and provides a classification of systems based on cultivation methods (DWC, NFT, aeroponics), automation levels, and form factors. A detailed analysis is conducted of the technological aspects of IoT and artificial intelligence integration, including the role of multisensor monitoring of critical environmental parameters, remote management capabilities via mobile applications, and the energy efficiency of LED technologies. Research findings demonstrate significant ecological potential of compact farming: 51 % reduction in carbon footprint compared to imported vegetables, 96–97 % water savings for leafy crops, and multifaceted positive impacts on residential microclimate and the psycho-emotional wellbeing of urban residents. It is established that comprehensive energy consumption optimization enables achievement of 60–65 % reduction in electricity costs, shortening the investment payback period from 3–4 years to 1.5–2 years. Key directions for further industry development are identified: implementation of computer vision systems for plant health diagnostics, utilization of predictive analytics based on machine learning, and creation of urban food networks to establish a new paradigm of decentralized food security.

Bibliography

1. United Nations, Department of Economic and Social Affairs, Population Division. World population prospects 2022: Summary of results. United Nations, 2022. 52 p. URL: https://www.un.org/development/desa/pd/content/World-Population-Prospects-2022 (date of access: 10.01.2026).

2. Bai Z. G., Dent D. L., Olsson L., Schaepman M. E. Proxy global assessment of land degradation. *Soil Use and Management.* 2008. Vol. 24, No. 3. P. 223–234. DOI: https://doi.org/10.1111/j.1475-2743.2008.00169.x

3. Wolfert S., Ge L., Verdouw C., Bogaardt M.-J. Big data in smart farming – A review. *Agricultural Systems.* 2017. Vol. 153. P. 69–80. DOI: https://doi.org/10.1016/j.agsy.2017.01.023

4. Sharma N., Acharya S., Kumar K., Singh N., Chaurasia O. P. Hydroponics as an advanced technique for vegetable production: An overview.

Journal of Soil and Water Conservation. 2018. Vol. 17, No. 4. P. 364–371. DOI: https://doi.org/10.5958/2455-7145.2018.00056.5

5. Benke K., Tomkins B. Future food-production systems: Vertical farming and controlled-environment agriculture. *Sustainability: Science, Practice and Policy.* 2017. Vol. 13, No. 1. P. 13–26. DOI: https://doi.org/10.1080/15487733.2017.1394054

6. Despommier D. Farming up the city: The rise of urban vertical farms. *Trends in Biotechnology.* 2013. Vol. 31, No. 7. P. 388–389. DOI: https://doi.org/10.1016/j.tibtech.2013.03.008

7. Kozai T., Niu G., Takagaki M. Plant Factory: An Indoor Vertical Farming System for Efficient Quality Food Production. 2nd ed. Academic Press, 2019. ISBN: 9780128166918. URL: https://www.amazon.com/dp/0128166916 (date of access: 10.01.2026).

8. Van Gerrewey T., Boon N., Geelen D. Vertical farming: The only way is up? *Agronomy*. 2022. Vol. 12, No. 1. Article 2. DOI: https://doi.org/10.3390/agronomy12010002

9. Resh H. M. Hydroponic food production: A definitive guidebook for the advanced home gardener and the commercial hydroponic grower. 7th ed. CRC Press, 2012. DOI: https://doi.org/10.1201/b12500

10. Bugbee B. Economics of LED lighting. *HortScience*. 2016. Vol. 51, No. 11. P. 1286–1288. DOI: https://doi.org/10.21273/HORTSCI11110-16

11. Sharma R., Kamble S. S., Gunasekaran A., Kumar V., Kumar A. A systematic literature review on machine learning applications for sustainable agriculture supply chain performance. *Computers & Operations Research.* 2020. Vol. 119. Article 104926. DOI: https://doi.org/10.1016/j.cor.2020.104926

12. Singh M. C., Singh J. P., Pandey S. K., Mahay D., Srivastava V. K. Factors affecting the performance of greenhouse cucumber cultivation: A review. *International Journal of Current Microbiology and Applied Sciences*. 2017. Vol. 6, No. 10. P. 2304–2323. DOI: https://doi.org/10.20546/ijcmas.2017.610.272

13. Velazquez-Gonzalez R. S., Garcia-Garcia A. L., Ventura-Zapata E., Barceinas-Sanchez J. D. O., Sosa-Savedra J. C. A review on hydroponics and the technologies associated for medium- and small-scale operations. Agriculture. 2022. Vol. 12, No. 5. Article 646. DOI: https://doi.org/10.3390/agriculture12050646

14. Портативна гідропонна установка: пат. 161674 Україна, МПК (2025.01) A01G 31/00 / Ковальов М. М., Васильковська К. В., Михайлова Д., Васильковський О. М.; заявник і патентотримач Центральноукр. нац. техн. ун-т. № u 2025 02061; заявл. 02.05.2025;

опубл. 24.12.2025, Бюл. № 52. URL: https://sis.nipo.gov.ua/uk/search/detail/1891980/ (дата звернення: 10.01.2026).

15. Lakhiar I. A., Gao J., Syed T. N., Chandio F. A., Buttar N. A. Modern plant cultivation technologies in agriculture under controlled environment: A review on aeroponics. *Journal of Plant Interactions.* 2018. Vol. 13, No. 1. P. 338–352. DOI: https://doi.org/10.1080/17429145.2018.1472308

16. Pennisi G., Orsini F., Castillejo N., Gomez P. A., Crepaldi A., Fernandez J. A., Egea-Gilabert C., Artés F., Gianquinto G., Hernández J. Resource use efficiency of indoor lettuce (Lactuca sativa L.) cultivation as affected by red:blue ratio provided by LED lighting. *Scientific Reports*. 2019. Vol. 9. Article 14127. DOI: https://doi.org/10.1038/s41598-019-50783-z

17. Avgoustaki D. D., Xydis G. Indoor vertical farming in the urban nexus context: Business growth and resource savings. *Sustainability*. 2020. Vol. 12, No. 5. Article 1965. DOI: https://doi.org/10.3390/su12051965

18. Martin M., Molin E. Environmental assessment of an urban vertical hydroponic farming system in Sweden. *Sustainability*. 2019. Vol. 11, No. 15. Article 4124. DOI: https://doi.org/10.3390/su11154124

19. Chen L., Gao W., Chen S., Wang L., Sun D., Xu M., Zhai C. Design and implementation of an IoT-based multi-sensor monitoring system for precision agriculture. *IEEE Access.* 2020. Vol. 8. P. 191378–191388. DOI: https://doi.org/10.1109/ACCESS.2020.3032463

20. Beacham A. M., Vickers L. H., Monaghan J. M. Vertical farming: a summary of approaches to growing skywards. *Journal of Horticultural Science & Biotechnology*. 2019. Vol. 94, No. 3. P. 277–283. DOI: https://doi.org/10.1080/14620316.2019.1574214

21. Trejo-Téllez L. I., Gómez-Merino F. C. Nutrient solutions for hydroponic systems. In: Asao T. (Ed.). Hydroponics – A standard methodology for plant biological researches. InTech, 2012. P. 1–22. DOI: https://doi.org/10.5772/37578

22. Sambo P., Nicoletto C., Giro A., Pii Y., Valentinuzzi F., Mimmo T., Lugli P., Orzes G., Mazzetto F., Astolfi S., Terzano R., Cesco S. Hydroponic solutions for soilless production systems: Issues and opportunities in a smart agriculture perspective. *Frontiers in Plant Science.* 2019. Vol. 10. Article 923. DOI: https://doi.org/10.3389/fpls.2019.00923

23. Kumar A., Surendra H. J., Mohan S., Valliappan K. M., Kirthika N. Internet of Things based smart irrigation and fertilization system. *International Journal of Engineering and Advanced Technology.* 2021. Vol. 10, No. 3. P. 42–47. DOI: https://doi.org/10.35940/ijeat.C2167.0210321

24. Bamsey M., Graham T., Thompson C., Berinstain A., Scott A., Dixon M. Ion-specific nutrient management in closed systems: The necessity

for ion-selective sensors in terrestrial and space-based agriculture and water management systems. *Sensors*. 2012. Vol. 12, No. 10. P. 13349–13392. DOI: https://doi.org/10.3390/s121013349

25. Bhattarai S., Midmore D. J., Pendergast L. Yield, water-use efficiencies and root distribution of soybean, chickpea and pumpkin under different subsurface drip irrigation depths and oxygation treatments in vertisols. *Irrigation Science.* 2020. Vol. 38. P. 333–350. DOI: https://doi.org/10.1007/s00271-020-00676-3

26. Jung D. H., Kim H. S., Jhin C., Kim H. J., Park S. H. Time-serial analysis of deep neural network models for prediction of climatic conditions inside a greenhouse. *Computers and Electronics in Agriculture*. 2021. Vol. 173. Article 105402. DOI: https://doi.org/10.1016/j.compag.2020.105402

27. Zamora-Izquierdo M. A., Santa J., Martínez J. A., Martínez V., Skarmeta A. F. Smart farming IoT platform based on edge and cloud computing. *Biosystems Engineering.* 2019. Vol. 177. P. 4–17. DOI: https://doi.org/10.1016/j.biosystemseng.2018.10.014

28. Beaman A. R., Gladon R. J., Schrader J. A. Sweet basil requires an irradiance of 500 $\mu mol \cdot m^{-2} \cdot s^{-1}$ for greatest edible biomass production. *HortScience.* 2021. Vol. 44, No. 1. P. 64–67. DOI: https://doi.org/10.21273/HORTSCI.44.1.64

29. Pattison P. M., Tsao J. Y., Brainard G. C., Bugbee B. LEDs for photons, physiology and food. *Nature*. 2018. Vol. 563. P. 493–500. DOI: https://doi.org/10.1038/s41586-018-0706-x

30. Graamans L., Baeza E., van den Dobbelsteen A., Tsafaras I., Stanghellini C. Plant factories versus greenhouses: Comparison of resource use efficiency. *Agricultural Systems.* 2018. Vol. 160. P. 31–43. DOI: https://doi.org/10.1016/j.agsy.2017.11.003

31. Weber C. L., Matthews H. S. Food-miles and the relative climate impacts of food choices in the United States. *Environmental Science & Technology.* 2008. Vol. 42, No. 10. P. 3508–3513. DOI: https://doi.org/10.1021/es702969f

32. Nelson J. A., Bugbee B. Economic analysis of greenhouse lighting: Light emitting diodes vs. high intensity discharge fixtures. *PLoS ONE*. 2014. Vol. 9, No. 6. Article e99010. DOI: https://doi.org/10.1371/journal.pone.0099010

33. Goldstein B., Hauschild M., Fernández J., Birkved M. Testing the environmental performance of urban agriculture as a food supply in northern climates. *Journal of Cleaner Production.* 2016. Vol. 135. P. 984–994. DOI: https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2016.07.004

34. Sanyé-Mengual E., Cerón-Palma I., Oliver-Solà J., Montero J. I., Rieradevall J. Environmental analysis of the logistics of agricultural products

from rooftop greenhouses in Mediterranean urban areas. *Journal of the Science of Food and Agriculture*. 2013. Vol. 93, No. 1. P. 100–109. DOI: https://doi.org/10.1002/jsfa.5736

35. Benis K., Reinhart C., Ferrão P. Development of a simulation-based decision support workflow for the implementation of building-integrated agriculture (BIA) in urban contexts. *Journal of Cleaner Production.* 2017. Vol. 147. P. 589–602. DOI: https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2017.01.130

36. Romeo D., Vea E. B., Thomsen M. Environmental impacts of urban hydroponics in Europe: A case study in Lyon. *Procedia CIRP.* 2018. Vol. 69. P. 540–545. DOI: https://doi.org/10.1016/j.procir.2017.11.048

37. Barbosa G. L., Gadelha F. D. A., Kublik N., Proctor A., Reichelm L., Weissinger E., Wohlleb G. M., Halden R. U. Comparison of land, water, and energy requirements of lettuce grown using hydroponic vs. conventional agricultural methods. *International Journal of Environmental Research and Public Health.* 2015. Vol. 12, No. 6. P. 6879–6891. DOI: https://doi.org/10.3390/ijerph120606879

38. Mekonnen M. M., Hoekstra A. Y. The green, blue and grey water footprint of crops and derived crop products. *Hydrology and Earth System Sciences.* 2011. Vol. 15, No. 5. P. 1577–1600. DOI: https://doi.org/10.5194/hess-15-1577-2011

39. Specht K., Siebert R., Hartmann I., Freisinger U. B., Sawicka M., Werner A., Thomaier S., Henckel D., Walk H., Dierich A. Urban agriculture of the future: An overview of sustainability aspects of food production in and on buildings. *Agriculture and Human Values*. 2014. Vol. 31, No. 1. P. 33–51. DOI: https://doi.org/10.1007/s10460-013-9448-4

40. Al-Kodmany K. The vertical farm: A review of developments and implications for the vertical city. *Buildings*. 2018. Vol. 8, No. 2. Article 24. DOI: https://doi.org/10.3390/buildings8020024

41. Vasylkovska K., Kovalov M., Vasylkovskyi O., Michailova D. Determining optimal cultivation parameters for a portable hydroponic system using the nutrient film technique. *Asian Journal of Water, Environment and Pollution.* 2025. Vol. 22, No. 3. P. 185–197. DOI: https://doi.org/10.36922/AJWEP025170132

42. Ellingsen H., Olaussen J. O., Utne I. B. Environmental analysis of the Norwegian fishery and aquaculture industry – A preliminary study focusing on farmed salmon. *Marine Policy*. 2009. Vol. 33, No. 3. P. 479–488. DOI: https://doi.org/10.1016/j.marpol.2008.11.002

43. Thomsen J. D., Sønderstrup-Andersen H. K. M., Müller R. People-plant relationships in an office workplace: Perceived benefits for the workplace and employees. *HortScience*. 2011. Vol. 46, No. 5. P. 744–752. DOI: https://doi.org/10.21273/HORTSCI.46.5.744

44. Kellert S. R. Nature by design: The practice of biophilic design. Yale University Press, 2018. URL: https://yalebooks.yale.edu/book/9780300235432/nature-by-design/ (date of access: 10.01.2026).

45. Wolverton B. C., McDonald R. C., Watkins E. A. Foliage plants for removing indoor air pollutants from energy-efficient homes. *Economic Botany.* 1984. Vol. 38, No. 2. P. 224–228. DOI: https://doi.org/10.1007/BF02858837

46. Soga M., Gaston K. J., Yamaura Y. Gardening is beneficial for health: A meta-analysis. *Preventive Medicine Reports*. 2017. Vol. 5. P. 92–99. DOI: https://doi.org/10.1016/j.pmedr.2016.11.007

47. Allen J. G., MacNaughton P., Satish U., Santanam S., Vallarino J., Spengler J. D. Associations of cognitive function scores with carbon dioxide, ventilation, and volatile organic compound exposures in office workers: A controlled exposure study of green and conventional office environments. *Environmental Health Perspectives.* 2016. Vol. 124, No. 6. P. 805–812. DOI: https://doi.org/10.1289/ehp.1510037

Information about the author:
Kovalov Mykola Mykolaiovych,
Candidate of Agricultural Sciences, Associate Professor,
Head of the Scientific Laboratories “Industrial mushroom growing and protection technologies of cultivated mushrooms”,
as well as “Hydroponic cultivation of vegetables in a dome greenhouse”,
Associate Professor of the Department of General Agriculture,
Central Ukrainian National Technical University
8, Universytetskyi avenue, Kropyvnytskyi, 25006, Ukraine

CHAPTER 10

ЕКОЛОГІЧНА ПРОСТОРОВА ОЦІНКА ТЕРИТОРІЇ ЯК ОСНОВА СТРАТЕГІЧНОГО ПРОСТОРОВОГО ПЛАНУВАННЯ РОЗВИТКУ ТЕРИТОРІАЛЬНИХ ГРОМАД В УКРАЇНІ (НА ПРИКЛАДІ ПРОЄКТУ «АЛЕЯ 12,7 КМ»)

Смірнова М. П.
DOI https://doi.org/10.30525/978-9934-26-654-6-10

ВСТУП

В умовах глобальної дефіцитності прісної води (менше 1 % доступних ресурсів[1]) та стрімкої урбанізації (11 % населення світу не мають доступу до питної води[2]), інтегроване управління прибережними територіями стає пріоритетом стратегічного та сталого міського розвитку. Для України ця проблема загострюється критичною деградацією гідрологічної мережі: за останні 30 років через антропогенний тиск зникло понад 10 000 малих річок[3]. Затвердження Водної стратегії України до 2050 року (Постанова КМУ № 1134-р від 09.12.2022), ратифікація Рамкової директиви ЄС з водних ресурсів (Директива 2000/60/ЄС) у рамках Угоди про асоціацію з ЄС (Закон № 1678-VII від 16.09.2014) та включення питань сталого водокористування до Національної економічної стратегії до 2030 року (Постанова КМУ № 179 від 03.03.2021) демонструють намір держави підвищити пріоритет управління водними ресурсами як ключового фактора сталого розвитку. Однак від стратегічних намірів до практичної реалізації ще далеко. Існуюча система управління водними ресурсами досі не здатна ефективно вирішувати такі критичні проблеми, як постійне забруднення води, труднощі з розподілом води та виклики, з якими стикаються окремі види водокористування у короткостроковій перспективі[4].

---

[1] WWF-Ukraine. Прісна вода: робота WWF в Україні. 2024. URL: https://wwf.ua/our-work/freshwater/

[2] UN-Habitat. Water and Sanitation. 2023. URL: https://unhabitat.org/water-and-sanitation-2

[3] Інформаційний центр «Зелене досьє». День Водних ресурсів: цифри, факти й перспективи. URL: https://www.dossier.org.ua/news/den-vodnih-resursiv-cifri-fakti-y-perspektivi/

[4] Чумаченко І. Принципи державного управління в галузі використання та охорони вод: теоретико-правові аспекти. *Науково-практичний журнал «Екологічне право»*. 2019. Випуск 3. DOI: https://doi.org/10.37687/2413-7189.2019.3.9

Існуючі плани управління річковими басейнами зосереджуються на гідрохімічних показниках, але ігнорують морфологічний стан берегів та ландшафтний контекст. Відсутність методологічного зв'язку між екологічною оцінкою та рішеннями з містобудування призводить до того, що стратегічне планування територій здійснюється без урахування екосистемної спроможності ландшафту. Це зумовлює необхідність впровадження нових методологій, заснованих на екологічній просторовій оцінці, як основи для прийняття управлінських рішень.

1. Актуальність теми

Річка Південний Буг є стратегічним об'єктом національного значення – це єдина велика річка України (довжиною понад 800 км), чий басейн (11 % території держави) повністю розташований у межах держави. Для Вінницької міської територіальної громади (ВМТГ) річка виконує критичну життєву функцію, забезпечуючи 82 % потреб міста у централізованому водопостачанні[5]. Крім того, береги річки входять до національної екомережі та неофіційної Смарагдової мережі України (UA0000333) згідно з нормами Бернської конвенції[6], що підтверджує їхню природну цінність. Попри наявність планів управління басейном Південного Бугу, розробленого у 2009 році за підтримки міжнародних донорів, з постійним оновленням кожні 5–6 років, стан води залишається незадовільним. Ключовою проблемою є секторальний підхід, який зосереджується на якості води без урахування урбаністичних процесів та просторового виміру. Плани не враховують взаємозв'язку між забудовою прибережних територій та деградацією екосистем. Додатковим бар'єром є відсутність інституційної спроможності на локальному рівні для реалізації комплексних заходів щодо відновлення та збереження прибережних зон, а також фрагментарність управлінських підходів, що унеможливлює цілісний погляд на всю територію водозбірного басейну.

Сучасний стан прибережної зони в межах міста Вінниця характеризується низкою конфліктів, а саме антропогенним навантаженням (висока частка промислового (39,1 %) та сільськогосподарського

[5] Вінницька міська рада. Програма комплексного відновлення : Рішення Виконавчого комітету № 1399 від 13.06.2024. 2024. URL: https://2021.vmr.gov.ua/Docs/ExecutiveCommitteeDecisions/2024/№1399%2013-06-2024.pdf

[6] Council of Europe. Draft list of adopted Emerald Network sites (Bern Convention). 2023. URL: https://rm.coe.int/draft-list-of-adopted-emerald-network-sites/1680ad54a1

(37,4 %) водокористування)[7], просторовою фрагментованістю з порушенням Водного Кодексу, а також санітарним станом (забруднення твердо-побутовими відходами). Згідно з законодавством, територіальні громади зобов'язані розробляти комплексні плани просторового розвитку, які мали б запобігати таким конфліктам. Проте критичним недоліком є те, що рішення про трансформацію земель приймаються раніше, ніж проводиться аналіз стану довкілля в розділі ландшафтного плану, що унеможливлює врахування екосистемних ризиків для водних об'єктів. Зазначені чинники вимагають переходу від класичного точкового благоустрою до стратегічного просторового планування всієї берегової лінії.

Проєкт «Алея 12,7 км» актуальний необхідністю зміні в містопланувальному розвитку: від локальних точкових втручань до комплексної довгострокової стратегії сталого розвитку міської території. Проєкт пропонує модель доказового планування, де рішення базуються на використання екологічно просторової оцінки та думки місцевих жителів.

В умовах зміни клімату, що стає дедалі відчутнішою, відновлення натуральності прибережних зон стає необхідністю для зміцнення міської стійкості. Це вимагає інтеграції екологічної просторової оцінки на ранніх етапах планування. Реалізація таких комплексних проєктів потребує перегляду існуючих практик управління прибережними територіями, зокрема необхідно створення спеціалізованих муніципальних планувальних інституцій (проєктних офісів), здатних координувати екологічні, соціальні та інфраструктурні аспекти з довгостроковим супроводом.

Проєкт «Алея 12,7 км» це практичний досвід інтеграції унікальної методології в практику муніципального розвитку та може слугувати прикладом для інших українських міст, що стикаються з аналогічними викликами деградації прибережних зон.

2. Стан вивчення питання та прогалин тематики

Проєкт «Алея 12,7 км» (реєстраційний номер в Концепції інтегрованого розвитку міста Вінниця 2030 (КІРМ) – V4P33) відображає десятирічну еволюцію планувальних рішень – від фрагментарних просторових досліджень до інтегрованого просторового управління з включенням кліматичного порядку денного. Інституційним носієм проєкту є комунальне підприємство «Агенція просторового розвитку» Вінницької міської ради,

[7] План управління річковим басейном південного Бугу на 2025–2030 роки від 01.11.2024 р. № 1078. URL: https://mepr.gov.ua/diyalnist/plany/plany-upravlinnya-richkovymy-basejnamy-2025-2030-roky/

що забезпечує тяглість планувальних рішень в рамках проєкту Integrated Urban Development in Ukraine II, який здійснювався з 2019-2025 рр. в Україні Німецьким товариством міжнародного співробітництва GIZ (Deutsche Gesellschaft für Internationale Zusammenarbeit). Головною метою проєкту є створення безперервного пішохідного маршруту вздовж річки Південний Буг в межах міста Вінниця. І для реалізації такого складного урбаністичного проєкту була обрана екологічна просторова оцінка як основний спосіб розвитку міських ландшафтів.

Екологічна просторова оцінка території – це комплексний аналіз і картографування екологічного стану певної географічної території з урахуванням просторового розподілу екологічних факторів. Цей процес є частиною розробки інтегрованих концепцій розвитку у просторовому плануванні. Екологічна просторова оцінка стала важливим інструментом сталого територіального планування в Європі з другої половини XX століття, коли зростаюча урбанізація та відчутні екологічні виклики вимагали нових методологічних підходів. Цей аналіз почав розвиватись з моменту як з'явилась *ландшафтна екологія*, яку запровадив німецький географ Карл Тролль через аналіз аерофотознімків в географії[8]. Німецька традиція ландшафтного планування (*Landschaftsplanung*) заклала методологічні основи для систематичної екологічної оцінки, інтегрованої з просторовим плануванням[9]. Цей підхід використовує подвійні критерії оцінки «цінності» (значимість для конкретних функцій) та «чутливості» (вразливість до впливів) для оцінки компонентів ландшафту.

Відновлення річок є ключовою задачею міст Європейського Союзу для підвищення їх стійкості до зміни клімату та покращення умов життя[10]. Останні розробки акцентують увагу на адаптації до зміни клімату за допомогою рішень, заснованих на природі (природо орієнтованих рішеннях)[11], та оцінці екосистемних послуг[12]. Сучасна

---

[8] Farina A.Principles and Methods in Landscape Ecology. Towards a Science of the Landscape. 2006. URL: https://link.springer.com/book/10.1007/978-1-4020-5535-5

[9] Haaren C., Vollheyde A.-L., Landscape planning in Germany. *J-Stage.* Vol. 7. Is. 4 P. 148–166. 2019. URL: https://www.jstage.jst.go.jp/article/irspsd/7/4/7_148/_article

[10] Francis R. A. Positioning urban rivers within urban ecology. 2012. *Urban Ecosystems*. Vol. 15 (2). P. 285–291. URL: https://www.researchgate.net/publication/236036017

[11] Kabisch N., Frantzeskaki N., Pauleit S., et al. Nature-based solutions to climate change mitigation and adaptation in urban areas: Perspectives on indicators, knowledge gaps, barriers, and opportunities for action. 2016. *Ecology and Society*. Vol. 21 (2). P. 39. URL: https://www.researchgate.net/publication/303733232

[12] Costanza R., de Groot R. et al. Twenty years of ecosystem services: How far have we come and how far do we still need to go? 2017. *Ecosystem Services*. Vol. 28, Part A. P. 1–16. URL: https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S2212041617304060

парадигма відновлення міських прибережних територій базується на переході від суто інженерних архітектурних рішень, таких як дамби та бетонні набережні, до концепції відновлення біорізноманіття зі створенням зелено-блакитної інфраструктури, наприклад дощових садів та зменшення теплового острова.

Світовий досвід ревіталізації міських прибережних територій набув популярності завдяки відчутним економічним та соціальним перевагам від перетворення деградованих територій на нові громадські простори для комунікації та споглядання за природою[13]. З посиленням впливу кліматичної кризи, у світовій практиці тепер можна зустріти більше прикладів, які на меті мають не отримати більшої економічної вигоди, а повернути екологічну рівновагу. Сучасна парадигма відновлення міських річок базується на принципах *Adaptive Management*, що передбачає відмову від статичних інженерних споруд на користь гнучких природних систем. Найбільш успішним підходом до відновлення берегів, участі зацікавлених сторін у впровадженні природо орієнтованих рішень (NbS), став підхід муніципалітету Мюнхена у Німеччині до річки Ізар, що є прикладом де пріоритетом стало відновлення саме природного русла та заплав у щільній міській забудові[14]. Раніше фіксоване русло річки, схоже на канал, перетворилося на русло різної ширини з гравійними берегами та гравійно-кам'яними островами, які динамічно розвиваються за системою припливів і відпливів[15] і демонструють значення скорочення підтоплень. Цей приклад також відповідає принципам концепції *Productive Landscapes,* що переосмислює прибережні території не як пасивні зони благоустрою, а як активні інфраструктурні об'єкти, що генерують екосистемні послуги[16]. У межах цього підходу *продуктивність* вимірюється не економічним видобутком, а здатністю ландшафту виконувати критичні функції: очищення поверхневого стоку, поглинання вуглецю, регулювання температурного режиму міських

[13] World Economic Forum. Transforming waterfronts for a resilient, sustainable urban future. 2025. URL: https://www.weforum.org/stories/2025/04/transforming-waterfronts-resilient-sustainable-urban-future/

[14] Enu K., Zingraff-Hamed A., Lupp G., Stakeholder priorities and navigating barriers in urban river restoration: Comparative insights from Germany and Ghana. *Environmental and Sustainability Indicators.* 2025. Vol. 26. URL: https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2665972725001047#bib28

[15] European Climate Adaptation Platform. Isar Plan – Water management plan and restoration of the Isar River, Munich, Germany. 2013. URL: https://climate-adapt.eea.europa.eu/en/metadata/case-studies/isar-plan-2013-water-management-plan-and-restoration-of-the-isar-river-munich-germany

[16] Akyol M., Tuncay H. E. Productive landscapes and resilient cities. 2014. *A/Z ITU journal of Faculty of Architecture.* Vol. 10 (2). P. 133–147. URL: https://www.researchgate.net/publication/287192976

теплових островів та підтримку біорізноманіття. Такий ландшафт разом з урбанізованими територіями об'єднується в цілісну екосистему, де кожен елемент – від заплавної луки до біоплато – працює на зниження вразливості громади до екологічних викликів. Це принципово відрізняє інтегроване ландшафтне планування від класичних проєктів набережних, які часто обмежуються декоративною функцією, ігноруючи потенціал території як життєзабезпечуючої системи міста.

Взірцевим прикладом інтегрованого підходу є ревіталізація річки Безос у Барселоні[17]. Цей проєкт продемонстрував успішне поєднання інженерного захисту від повеней із функціонуванням великих масивів штучних водно-болотних угідь (*constructed wetlands*). Створена система працює як природний фільтр, що значно покращує якість води та відновлює біорізноманіття, водночас надаючи мешканцям 9 км безперервного зеленого коридору для відпочинку, в тому числі вздовж місць забору води та скиду очищених стоків.

У європейському контексті для успішності реалізації проєктів встановлення прибережних територій є створення стратегій управління прибережними зонами на рівні локальних муніципалітетів та регіонів. Вони дедалі частіше орієнтуються на інтегрований підхід, де покращення якості води поєднується з відновленням біорізноманіття з залученням місцевих жителів до співпраці. Ініціативи, такі як План управління басейном річки Дунай, ілюструє реалістичність таких стратегій та успішність їх імплементації, він не тільки про поліпшення якості води, а й про збереження біорізноманіття та управління повенями[18] в масштабах всього басейну річки з урахуванням викликів урбанізованих територій, через які протікає річка. Такий підхід ще називають – *басейновим*. Підхід басейнового управління виходить за рамки секторального управління водними ресурсами, розглядаючи весь басейн як єдине ціле, інтегруючи всі джерела води (річки, підземні води, прибережні води) та залучаючи різноманітних зацікавлених сторін через партисипативне планування для довгострокового збереження ресурсів та рівного доступу[19]. Існують сході програми управління річками та відновлення їх берегів, наприклад для річки Темзи в Лондоні, що є прикладом поетапного впровадження тактичних рішень для забезпечення балансу між охороною природи та

[17] IAAC. Besos: Reviving and Harmonizing Urban Landscapes and River Health. 2021. URL: https://blog.iaac.net/besos-reviving-harmonizing-urban-landscapes-and-river-health-through-nature/

[18] ICPDR. Danube River Basin Management Plan. 2015. URL: https://www.icpdr.org/tasks-topics/tasks/river-basin-management/danube-river-basin-management-plan-2015

[19] Ibid.

міським розвитком[20], а також для річки Сена (*SDAGE Seine-Normandy*) який містить 28 орієнтацій та 124 положення, організовані навколо 5 фундаментальних напрямків, включаючи функціональні річки, збереження вологих територій, відновлення біорізноманіття, зменшення забруднення та адаптацію до кліматичних змін[21].

Теоретичним фундаментом для оцінки таких територій слугує методологія просторового аналізу, зокрема праця М.-Й. Фортін та М. Дейла "*Spatial Analysis: A Guide for Ecologists*"[22]. Автори наголошують на критичній важливості просторової зв'язності та аналізі ландшафтної гетерогенності для збереження екосистем. У межах цього підходу прибережні зони розглядаються як складні екотони, де управління *крайовими ефектами* та подолання фрагментації ландшафту є ключовими для підтримання екологічної стійкості міста. У науковій літературі фундаментальною методологією до визначення просторового потенціалу ландшафту залишається *Land Suitability Analysis*, розроблена Я. МакГаргом[23]. Метод із використанням прозорих карт-накладок дозволяє ідентифікувати зони з найменшим екологічним опором для впровадження інфраструктури, що є критичним для збереження вразливих прибережних екосистем.

Водночас, сучасні дослідження в галузі міського управління наголошують, що в умовах високої щільності інтересів (*stakeholder conflicts*) одного лише екологічного аналізу недостатньо. Як зазначають дослідники, вирішення конфліктів між охороною природи та соціальним запитом на рекреацію потребує застосування *Multi-Criteria Decision Analysis* (MCDA), що дозволяє пріоритезувати конкретні тактичні втручання у простір. Однак систематичний огляд застосування MCDA в охороні природи виявив превалювання експертних оцінок над партисипативними методами залучення громад, а також дефіцит аналізу

[20] Thames21. London Rivers Week: River restoration report. 2020. URL: https://www.thames21.org.uk/wp-content/uploads/2020/10/LRW-River-restoration-report-Final.pdf

[21] Yeung P., Paris' Seine River Rebounds: A Model for Urban Waterway Restoration. *Environment Energy Leader.* 2025. URL: https://www.environmentenergyleader.com/premium/stacker/stories/fish-are-thriving-in-the-river-seine,68905

[22] Bailey T., Spatial Analysis: A Guide for Ecologists. *Review*. 2006. https://doi.org/10.1111/j.1541-0420.2006.00588_3.x URL: https://academic.oup.com/biometrics/article-abstract/62/3/942/7321852?login=false

[23] Wagner M., Merson J.,Wentz E. Design with Nature: Key lessons from McHarg's intrinsic suitability in the wake of Hurricane Sandy. *Landscape and Urban Planning.* 2016. Vol. 155. URL: https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0169204616301207

чутливості та кластеризації уподобань зацікавлених сторін у процесі прийняття рішень[24].

Попри наявність ґрунтовних теоретичних розробок, практична реалізація екологічно орієнтованого планування в Україні стикається з низкою бар'єрів[25]. Сучасна система залишається значною мірою бюрократизованою та спирається на жорсткі методичні рекомендації, де ландшафтне планування, хоч і формально включене до складу Комплексних планів просторового розвитку громад (згідно із Законом № 711-IX), часто розробляється постфактум, коли основні планувальні рішення вже прийняті. В Україні методологія ландшафтного планування була адаптована та протестована на регіональному та локальному рівнях, зокрема в Черкаській області[26]. Новітні прецеденти інтеграції ЛП у Комплексні плани просторового розвитку Рогатинської та Пісочинської територіальних громад підтвердили можливість системного оцінювання екологічного потенціалу на муніципальному рівні[25]. Однак, попри успішність цих ініціатив, вони здебільшого залишаються інструментами стратегічного зонування цілої громади, де результати оцінки не завжди конвертуються у детальні операційні стратегії для окремих вразливих територій.

Проєкт «Алея 12,7 км» покликаний заповнити ці прогалини, демонструючи, як комплексна екологічна просторова оцінка може генерувати операційну рамку з конкретними локалізованими заходами на рівні територіальної громади.

3. Методологія, методи дослідження та опис процесу «Алея 12,7 км»

Береги річки Південний Буг були вперше ідентифіковані як цінний екологічний каркас міста у стратегічному планувальному документі «Комплексна стратегія міського транспорту та просторового розвитку»[27], розробленому у 2015 році. В наступні роки була спроба затвердити окрему концепцію розвитку берегів, яка виявилась невдалою, через

[24] Esmail B. A., Geneletti D., Multi-criteria decision analysis for nature conservation: A review of 20 years of applications. *Methods in Ecology and Evolution.* 2016. URL: https://besjournals.onlinelibrary.wiley.com/doi/epdf/10.1111/2041-210X.12899

[25] Маруняк Є., Голубцов О., Лісовський С., та ін. Методичні підходи і практика розробки ландшафтних планів територіальних громад (на прикладі Пісочинської та Роганської громад харківської області). 2022. *Ландшафтознавство* : журнал. № 2 (2). URL: https://vspu.net/landscapescience/index.php/journal/article/view/14/16

[26] Голубцов О. Ландшафтне планування: основні положення та досвід реалізації в Україні. 2021.Український географічний журнал. URL: https://ukrgeojournal.org.ua/sites/default/files/UGJ-1-2021-63-72.pdf

[27] Вінницька міська рада. Стратегія розвитку транспорту та просторового розвитку ВМТГ. 2015. URL: https://2021.vmr.gov.ua/ContentLibrary/ Стратегія%20транспорту.pdf

брак обґрунтувань урбаністичних рішень. У 2017 році, спираючись на результати практичних досліджень морфології берегів, було обґрунтовано створення безперервного маршруту завдовжки 12,7 км саме вздовж лівого берега, що зумовлено його вищою фізичною доступністю та меншим ступенем приватної забудови порівняно з правим берегом, який зазнав більшої урбанізації. Важливим етапом концептуалізації стала співпраця з CANactions School of Urban Studies, що дозволила презентувати візію проєкту на міжнародному архітектурному форумі та закласти підґрунтя для формування партисипативної спільноти «Спільний берег».

Протягом 2018–2020 років акцент змістився на верифікацію безперервності пішохідних зв'язків та інституціоналізацію. Після затвердження «Алеї» як стратегічного пілотного об'єкту з призначенням відповідальної інституції, збір даних про території поглибився. За участю ГО "Urban curators" були розроблені «Передпроектні дослідження розвитку прибережних територій» з акцентом на сприйняття річки містянами, історичного зв'язку між берегами та ідеями щодо подальшого розвитку[28] (карта 1) за підтримки німецького товариства міжнародного співробітництва GIZ. За участю ГО було проведено серію воркшопів та глибинних інтерв'ю з фокус-групами, що дозволило дослідити ментальні карти сприйняття річки містянами. Результати були представлені під час публічної презентації. На основі цих даних, командою КП «Агенція просторового розвитку» були напрацьовані попередні просторові рішення, які були презентовані у вигляді виставки з запрошенням представників бізнесу, муніципалітету та наукової експертної спільноти.

Наступним кроком було залучення групи експертів з клімату, гідрографії та економіки з ГО "Restart Agency" для проведення аналізу режимів землекористування та оцінку вразливості територій до зміни клімату[29] за підтримки The City Climate Gap Fund (Gap Fund) від The World Bank. Результати аналізу були верифіковані через серію онлайн-консультацій з фаховою спільнотою Вінниці, що дозволило уточнити просторові рішення з застосуванням природо орієнтованих рішень. Паралельно за підтримки Gap Fund було розроблено комунікаційну стратегію, яка визначила ключових стейкхолдерів, бенефіціарів та напрацювала чіткі алгоритми взаємодії між муніципалітетом, бізнесом та громадою, що є необхідною умовою для переходу проєкту від стадії планування до фізичної реалізації.

[28] Urban Curators. Передпроектні дослідження для розробки концепції розвитку прибережних територій «Алея 12,7 км». 2020. URL: https://urbancurators.com.ua/ALEY-12-7-ALLEY-12-7

[29] Restart Agency. Техніко-економічне обґрунтування кліматичної компоненти проєкту «Алея 12,7 км». 2023. URL: https://drive.google.com/file/d/1KICQllbuw8kDZE8RFscpQ1vxRO9V4XmK/view

Карта 1. Аналіз трансформації прибережних територій річки Південний Буг в межах міста Вінниця

Заключний етап базувався на синтезі отриманих даних та розробці системи режимів користування (зонування), що пройшли апробацію під час серії практичних воркшопів з представниками муніципалітету та активних мешканців, з метою напрацювання пілотних проєктів. Початкові планувальні пропозиції були суттєво скореговані: застарілі рішення замінено на більш адаптивні, що відповідають реальному стану біотопів, правовому статусу земель та соціально-економічним викликам сьогодення. Поточна робота команди КП зосереджена на фіналізації операційних рекомендацій для муніципалітету щодо тактичної пріоритезації втілення проєкту.

Стратегічна методологія проєкту базується на п'яти взаємопов'язаних цілях, що визначають його цілісність. По-перше, це забезпечення гармонійних умов для співіснування людських активностей та природної екосистеми річки. По-друге, застосування інтегрованого підходу, який поєднує інфраструктурне планування з ландшафтними рішеннями та збереженням локальних традицій місця. По-третє це актуальність кліматичним викликам, що передбачають впровадження природо орієнтованих рішень для ренатуралізації берегів. Четверта та п'ята цілі стосуються соціального виміру: максимізації пішохідної доступності прибережних зон та активного залучення містян до процесів співтворення. Такий багатогранний підхід дозволяє трансформувати прибережну смугу у стійкий екологічний коридор, що відповідає засадам Європейського Зеленого курсу та Цілям Сталого розвитку ООН.

Методи, які були використані під час наробок базуються на польовому збору даних, інтерв'ю, аналізі містобудівної документації, використання глобальних відкритих геоданих та інструментів дистанційного зондування Землі (ДЗЗ). Для верифікації натурних досліджень та оцінки стану прибережних територій у масштабі громади було застосовано:

- Використання знімків Landsat та Sentinel через ресурси Climate Data, Copernicus Browser та EarthExplorer, що дозволило оцінити динаміку змін земельного покриву, стан водних об'єктів та виявити «міські острови тепла» вздовж річкового русла.
- Інтеграція даних міжнародних організацій (WWF, FAO, WRI, World Resources Institute, UN Biodiversity) та відкритих картографічних сервісів (Open Street Map, Wikimapia) для побудови точних пішохідних зв'язків.
- Аналіз даних про стан води у динаміці.

Особлива увага приділяється аналізу біотичного різноманіття територій, що входять до проєктного периметру. Методологія включала:

- Аналіз рідкісних видів: Використання даних Червоної книги України у поєднанні з глобальними базами даних Global Biodiversity

Information Facility (GBIF) та iNaturalist. Це дозволило верифікувати місця знаходження цінних видів флори та фауни.

• Екосистемний фокус: Пріоритетне обстеження вразливих біотопів – водно-болотних угідь, заплавних лук та лісових урочищ, що виконують функцію природних буферів річки.

Весь робочий процес був структурований у взаємопов'язані фази:

1. Збір даних та верифікація: Консолідація статистичної та просторової інформації з офіційних та відкритих джерел.
2. Проведення серій партисипативних залучень, вуличних інтерв'ю з користувачами прибережних територій та відкритої виставки отриманих попередніх напрацювань.
3. Просторова обробка (Processing): Геокодування даних та їх аналіз у середовищі GIS для виявлення екологічних загроз та зон кліматичної вразливості.
4. Синтез та планування: Трансформація результатів аналізу в оперативні планувальні рішення (зонування та тактичні інтервенції), адаптовані до інституційних реалій громади.
5. Апробація планувальних рішень з представниками різних соціальних та вікових груп населення, зацікавлених сторін зі сторони бізнесу та муніципалітету.
6. Фіналізації рішень та публічні презентації з оприлюдненням усіх даних.

4. Результати проєкту «Алея 12,7 км»

Дослідження виявило множинні виклики (карта 2) та конфлікти (карта 3) на території проєкту, що класифіковані за трьома векторами. По-перше, конфлікти доступності: приватизація ділянок, наявність закритих режимних об'єктів та промислових підприємств створюють фізичні бар'єри, що позбавляють громаду вільного доступу до природного ресурсу. З економічного погляду ці території залишаються малозадіяними через правову фрагментацію земель та відсутність інженерної інфраструктури, що знижує їхню інвестиційну привабливість. По-друге, екологічні конфлікти: деградація берега через бетонування та намиви, активне поширення інвазійних видів борщівник Сосновського, розрив-трава, клен ясенелистий) та забруднення відходами. По-третє, конфлікти використання: конкуренція між рибалками, спортсменами та відпочиваючими на тлі потенційних загроз подальшої забудови.

Аналіз транспортної мережі показав, що лівий берег має більш вдалу структуру порівняно з правим, проте інтеграція районів із річкою залишається слабкою.

Карта 2. Виклики прибережних територій річки Південний Буг в межах міста Вінниця

Карта 3. Основні територіальні конфлікти прибережних територій

Особливо критичною є ділянка біля Центрального мосту, де радянське планування, орієнтоване на захист від повеней, витіснило рекреаційну функцію на користь технічного тротуару. Шлях до берега від зупинок громадського транспорту займає 15–20 хвилин, часто пролягаючи через занедбані території, а відсутність організованих місць для паркування призводить до хаотичного накопичення приватних автомобілів у прибережній зоні.

Екологічна діагностика та гідроморфологічний стан

Картування біотопів дозволило класифікувати сім основних типів середовищ існування за системою EUNIS: найбільшу частку займають антропогенні середовища (I) – 23,5 % та лісові масиви (G) – 22,4 %. Водні екосистеми (C) складають 18,3 %, чагарники (F) – 15,8 %, луки (E) – 12,7 %, водно-болотні угіддя (D) – 4,2 %, а скельні виходи (H) – 3,1 %. Оцінка ґрунтів ідентифікувала чорноземи (43,2 %) та алювіальні ґрунти (28,7 %) як найцінніші активи, проте 31,4 % території є вразливими до ерозії, особливо на схилах з крутизною понад 5°.

Гідроморфологічний аналіз зафіксував прогресивну трансформацію берегової лінії: 3,2 км (25,2 %) було укріплено бетоном, а 2,1 км (16,5 %) – штучно насипано. Крім того, 1,8 км (14,2 %) берега постраждали від незаконного захоплення земель. Гідрологічні розрахунки (1960–2023 рр.) підтверджують кліматичні зміни: максимальний стік зменшився на 18 % при збільшенні тривалості повеней на 23 %, що вимагає адаптивних планувальних рішень.

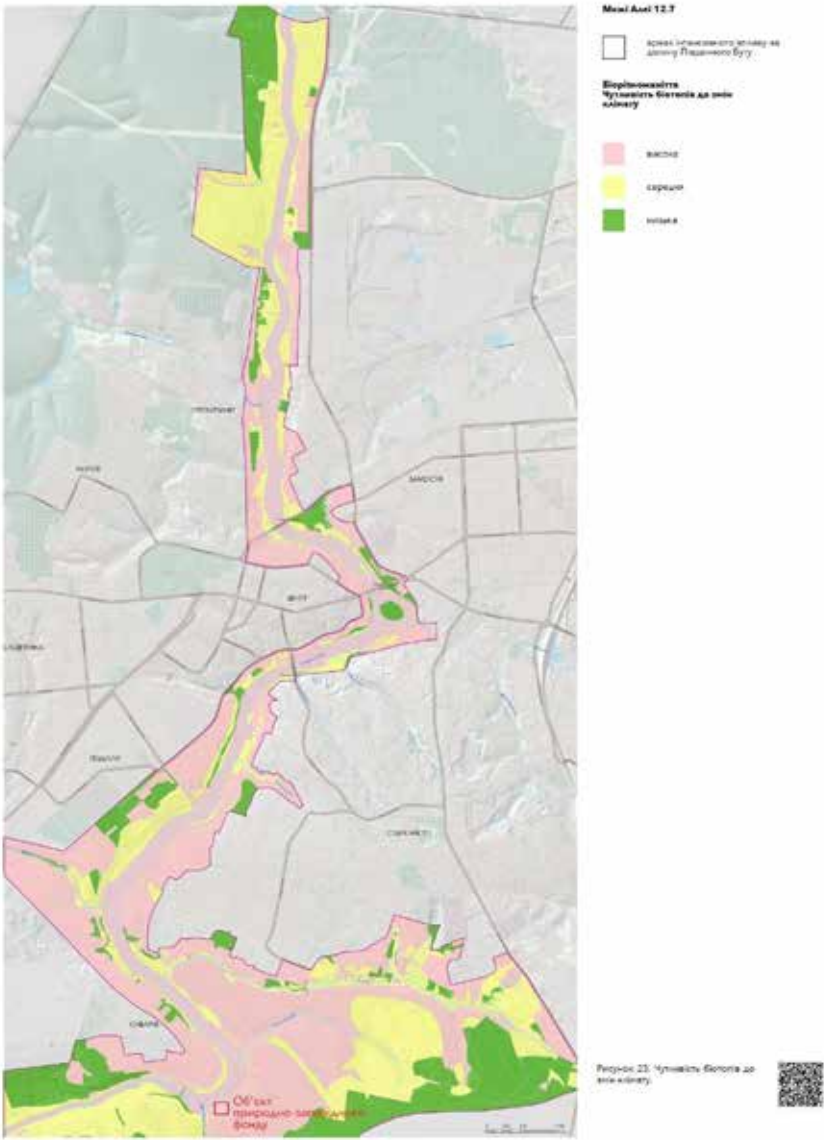
Кліматична вразливість та оцінка ризиків

Аналіз за сценарієм RCP8.5 прогнозує підвищення середньорічної температури на 2,3 °C до 2050 року та на 4,1 °C до 2100 року. Кількість літніх теплових хвиль зросте з 16 до 41 випадку на сезон до кінця століття. Гідрологічні розрахунки вказують на зменшення максимального стоку на 18 % та зниження стоку малих приток на 15–25 % у літні місяці.

Картування вразливості (карта 4) виявило критичні зони:

- Дуже висока вразливість (22,5 %): водно-болотні та водні екосистеми, чутливі до водного стресу.
- Висока вразливість (18,7 %): дубово-грабові ліси, яким загрожує дефіцит вологи та шкідники.
- Зони міських теплових островів (15,3 %): території, що потребують термінового охолодження.

Загальна оцінка ризиків виявила загрозу повеней для 8,7 % території, забруднення ґрунтових вод на 22,8 % площі, та ризик теплового стресу для відвідувачів на 15,3 % довжини коридору через відсутність затінення у пікові години.



Карта 4. Чутливість біотопів до зміни клімату, створена в рамках розробки «Техніко-економічного обґрунтування кліматичної компоненти проєкту «Алея 12, 7км» ГО “Restart Agency”

Трансформація землекористування та правові виклики

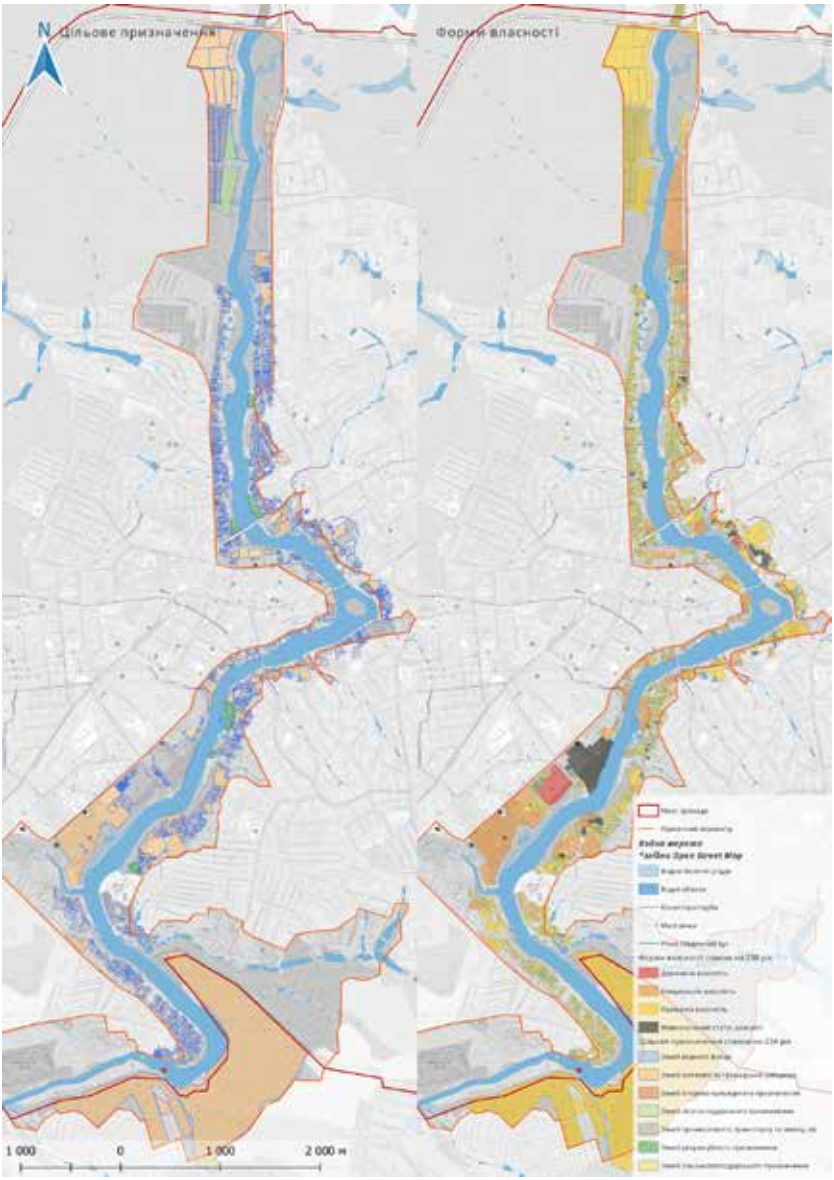
Аналіз структури землекористування виявив критичну фрагментацію прибережних територій (карта 5). У межах проєктного периметру (що охоплює значно ширшу зону, ніж нормативна прибережна захисна смуга – ПЗС) приватна власність складає найбільшу частку – понад 346 га. Це створює суттєві перепони для формування безперервних зв'язків та вимагає розробки складних правових механізмів узгодження режимів користування. Натомість муніципальна власність охоплює лише 79,6 га, що визначає ці ділянки як пріоритетні для створення публічних просторів.

Окрему увагу приділено ретроспективному аналізу втрат природних територій. Встановлено, що в період після 2010 року відбулася стрімка деградація берегової лінії через незаконні намиви та бетонування, внаслідок чого було фактично втрачено близько 15% природного берегового ландшафту, що раніше виконував функцію екологічного буфера. Наразі лише близько 255,5 га зберігають статус природно-захисних смуг, що є основою міського екологічного каркаса, проте навіть ці землі відчувають антропогенний тиск: 3,2 км берега вже закріплено бетоном, а 1,8 км територій постраждали від самовільного захоплення.

Соціальна компонента та режими рекреаційної активності

Дослідження соціального виміру набережної продемонструвало її роль як багатофункціонального простору самоідентифікації та транзиту. Основними групами користувачів є особи, що здійснюють прогулянки (індивідуально або в групах), займаються спортом, рибалять, вигулюють собак чи влаштовують пікніки. Для значної частини респондентів набережна виконує роль стратегічної транзитної зони або місця зустрічі.

Прогулянки класифіковано за типом організації на індивідуальні та групові. Індивідуальні активності часто мають характер ранкових ритуалів усамітнення, де цінується можливість внутрішньої рефлексії та спостереження за природою. Респонденти відзначають наявність специфічних практик, як-от відпочинок на нахилених деревах чи перебування в тихих локаціях подалі від транзитних потоків. Групові прогулянки, навпаки, потребують попереднього планування. Особливою категорією є сім'ї з дітьми віком до 6 років, для яких природа узбережжя виступає безкоштовним пізнавальним ресурсом. Проте ця група найбільш гостро відчуває брак інфраструктури та наявність бар'єрів, що ускладнюють рух із візками. Молодь переважно відвідує територію спонтанно, інтегруючи набережну у загальні міські маршрути, при цьому рекреація часто супроводжується споживанням їжі та напоїв, принесених з дому або придбаних у найближчому магазині.



Карта 5. Цільове призначення та форми власності земельних ділянок прибережних територій вздовж річки Південний Буг в межах міста Вінниця

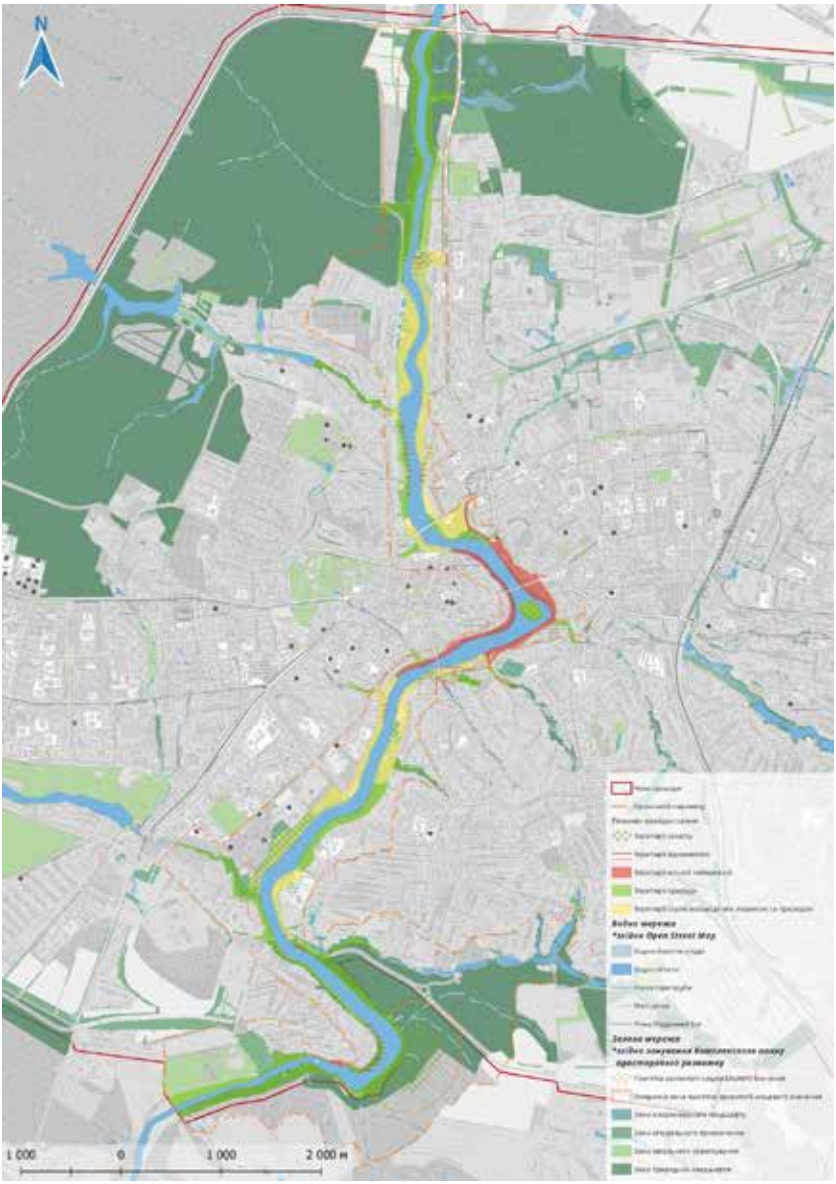
Функціональне зонування та режими використання

На основі синтезу соціальних запитів та екологічних обмежень розроблено систему з п'яти основних режимів користування (карта 6), назви яких відповідають стратегічним напрацюванням проєкту 2014–2025 років:

- Території природи: виконують роль центрів біорізноманіття, де пріоритетом є ренатуралізація та відновлення зеленої інфраструктури для управління зливовими водами.
- Територія сталої взаємодії між людиною та природою: зони з рекреаційним потенціалом, де допускається розміщення легких інфраструктурних об'єктів (павільйонів, пунктів прокату), що не порушують природний баланс.
- Міські набережні: інтенсивні громадські простори, що поєднують функції мобільності та соціалізації. Дизайн цих зон базується на інтеграції рослинності та природних систем фільтрації дощових вод.
- Території, що потребують відновлення: деградовані ділянки (внаслідок ерозії чи вирубки), що мають високий потенціал для перетворення на екологічно сталі простори за умови цілеспрямованої рекультивації.
- Території, що потребують захисту: вразливі екосистеми (заболочені ділянки, скельні виходи, місця концентрації рідкісних видів), де необхідно негайно запровадити суворі охоронні регламенти.

Проєктна модель тактичних втручань

Для реалізації вказаних режимів запропоновано групи важких та м'яких заходів. Зокрема, для забезпечення фізичної безперервності маршруту передбачено влаштування пішохідних помостів на палевих опорах, піднятих над водою. Кліматична адаптація реалізується через створення біоплато у гирлах малих річок, створенням мережі дощових садків для первинної очистки поверхневих стоків перед потраплянням у річки та формування зелених коридорів із висадкою аборигенних рослин та дерев. Програма також включає розвиток функціональних кластерів (освітнього біля школи № 29 та спортивного біля бази «Динамо») та модернізацію пляжів, що дозволить інтегрувати природний ландшафт у повсякденну структуру життєдіяльності громади (карта 7). До м'яких заходів відносяться винесення прибережно-захисних смуг в натуру та внесенням їх до державного кадастру, створення об'єктів природно-заповідного фонду, виділення зон, які потребують відновлення річкових заплав та контролю за розповсюдженням інвазійних видів.



Карта 6. Режими користування прибережними територіями вздовж річки Південний Буг в межах міста Вінниця

Карта 7. Тактичні фізичні інтервенції, необхідні для подолання просторових конфліктів по доступності берегів прибережних територій річки Південний Буг

Незважаючи на високу точність розроблених рішень, наразі проєкт залишається на стадії стратегічного планування. Фізична реалізація стримується перерозподілом ресурсів в умовах воєнного стану, а також інституційними бар'єрами: обмеженою зацікавленістю з боку муніципального управління та відсутністю виділеної команди для постійного супроводу проєкту. У результаті, напрацювання 2014–2025 років слугують доказовою базою та операційною платформою для майбутнього відновлення території, забезпечуючи сталий баланс між рекреаційною інклюзивністю та збереженням екосистемних послуг річки.

5. Дискусія

Ключовою теоретичною інновацією проєкту «Алея 12,7 км» є розробка системи режимів користування, яка виступає альтернативою традиційному функціональному зонуванню, закріпленому в українському законодавстві (ДБН Б.1.1-22:2017). Головним недоліком чинної нормативної бази в Україні є її антропоцентричність: зони розглядаються переважно з точки зору дозволених видів господарської діяльності, а не з метою захисту екосистем чи введення превентивних обмежень. На відміну від класичного підходу, запропоновані режими створюють рамкову основу для будь-яких втручань у прибережному периметрі. Це перегукується з міжнародною критикою жорсткого зонування (*Euclidean zoning*), яка вказує на його нездатність адаптуватися до динамічних екологічних змін. У міжнародній науковій дискусії все частіше звучить заклик до переходу на *Productive Landscapes*[30] та *Adaptive Management*, де обмеження є інструментом стійкості, а не просто юридичною формальністю.

Важливим аспектом дискусії є соціально-правовий конфлікт. Дані свідчать що при наявності 255,55 га природно-захисної смуги згідно Комплексного плану просторового розвитку, з них 50 га вже забудовані та втрачені. Інтеграція соціальної компоненти виявила високий запит громади на терапевтичні ландшафти та потреби у безперешкодному доступі до води. Тому наявність 346 га сформованих земельних ділянок у межах проєктного периметру у приватній власності створює ілюзію присутності річки у місті та ментального зв'язку між нею та містянами. Дослідження проєкту демонструє, що в українських реаліях

[30] Akyol M., Tuncay H. E. Productive landscapes and resilient cities. 2014. *A/Z ITU journal of Faculty of Architecture* Vol. 10 (2). P. 133–147. URL: https://www.researchgate.net/publication/287192976https://www.researchgate.net/publication/287192976_Productive_landscapes_and_resilient_cities

розвиток прибережних територій має супроводжуватися соціальною відповідальністю муніципалітету перед містянами щодо захисту берегів від забудови та виконанням законодавства.

Відсутність практичної імплементації проєкту демонструє суттєвий розрив між високим рівнем екологічно просторової оцінки та інституційною неспроможністю до її впровадження. На відміну від міжнародного досвіду (наприклад, кейс річки Ізар), де за стадією візії слідує гарантоване фінансування, українські громади стикаються з дефіцитом законодавчого підґрунтя для аргументації витрат на NbS у часи війни. Це піднімає питання про необхідність децентралізації екологічної відповідальності: коли громада сама стає суб'єктом управління річкою через створення спеціалізованих локальних відділів (річкових офісів), не чекаючи централізованих субвенцій.

Окремої уваги заслуговує часова тяглість проєкту, яка становить понад 10 років (2014–2025). У контексті українського міського планування, де більшість стратегічних ініціатив втрачають актуальність зі зміною політичних циклів, десятирічне існування «Алеї 12,7 км» є безпрецедентним показником стійкості. Така сталість стала можливою завдяки наявності сформованого інституційного носія – профільного комунального підприємства (КП), яке забезпечує неперервність роботи над проєктом незалежно від зовнішніх факторів. Наявність КП як постійного модератора дозволила проєкту пройти шлях від первинної екологічної візії до деталізованої просторової аналітики та картографування.

Нарешті, проєкт протиставляється домінуючому в Україні класичному благоустрою (як у випадках Києва чи Тернополя), який часто реалізується закритим способом. «Алея 12,7 км» через свій публічний розголос та відкритість даних зближується з передовими українськими ініціативами (такі як Зелений коридор Сапалаївка, Довга Стежка, Концепція розвитку річки Случ), формуючи нову школу міського ландшафтного планування, де пріоритетом є кліматична безпека, а не візуальна декоративність.

ВИСНОВКИ

Проєкт «Алея 12,7 км» демонструє ефективність застосування методів екологічної просторової оцінки території для розробки конкретних планувальних рішень у сфері розвитку прибережних територій. Послідовне виконання етапів оцінювання – від визначення рамкових цілей до формування системи тактичних рішень – забезпечило комплексний та науково обґрунтований підхід до планування. Результати кліматичної оцінки для Вінниці безапеляційно доводять: єдиним життєздатним шляхом розвитку прибережних територій є збереження природності. Зменшення

стоку приток на 15–25 % та ризики теплових островів роблять класичний підхід небезпечними для міського мікроклімату, підтверджуючі необхідність впровадження саме розроблених у проєкті режимів. Застосування подвійної системи оцінювання за категоріями цінність та чутливість дозволило виявити не лише найбільш цінні для збереження ділянки, але й території, що потребують першочергових заходів із ренатуралізації. Інтеграція оцінки вразливості до кліматичних змін у систему екологічного зонування, забезпечила проактивний характер планування та можливість адаптації території до майбутніх кліматичних умов.

Картографічний синтез результатів оцінювання у ГІС-середовищі виявився ефективним інструментом для просторового аналізу та прийняття планувальних рішень. Створення серії тематичних карт дозволило візуалізувати складні взаємозв'язки між різними компонентами довкілля та забезпечило можливість оперативного аналізу альтернативних варіантів планувальних рішень. Інтегрована карта тактичних рішень з просторовою прив'язкою 10 груп заходів стала практичним інструментом для поетапної реалізації проєкту та може використовуватись для моніторингу прогресу.

Розроблена система екологічного зонування з чотирма функціональними зонами (охорона, ренатуралізація, розвиток інфраструктури, відновлення доступу) забезпечує баланс між збереженням екосистемних послуг та задоволенням рекреаційних потреб громади. Диференційований підхід до управління різними ділянками території дозволяє оптимізувати розподіл ресурсів та зосередити зусилля на пріоритетних напрямках.

Методологія екологічної просторової оцінки, апробована у проєкті «Алея 12,7 км», може бути адаптована для інших територіальних громад України, які мають прибережні території та стикаються з викликами урбанізації, втрати природних екосистем та необхідності адаптації до кліматичних змін. Критично важливими для успішного впровадження є: проведення комплексної оцінки до початку проєктування, використання ГІС-технологій для просторового аналізу, залучення міждисциплінарної команди експертів, активна участь громади на всіх етапах, поетапне впровадження з моніторингом результатів. Результати проєкту можуть використовуватись для стратегічної екологічної оцінки планів просторового розвитку територіальних громад та інтеграції екологічної складової у містобудівну документацію.

АНОТАЦІЯ

Стаття присвячена розробці та апробації методології екологічної просторової оцінки на прикладі проєкту «Алея 12,7 км» для інтегрованого

управління прибережними територіями річки Південний Буг в межах міста Вінниця в умовах зміни клімату та високого антропогенного навантаження. Актуальність зумовлена відсутністю в українській містобудівній практиці дієвих інструментів ландшафтного планування, інституційною інерцією та відсутністю інтегрованої екологічної оцінки у поточному планувальному процесі, що в умовах антропогенного тиску та кліматичної нестабільності призводить до незворотної деградації річкових систем. У роботі обґрунтовано необхідність зміни підходів муніципального управління через перехід від фрагментарного підходу до системного просторового планування на основі наукової верифікації. Модель доказового планування з застосуванням екологічно просторової оцінки до процесу прийняття остаточних рішень демонструє більшу підтримку їх активними мешканцями. Головним результатом проєкту є створення режимів користування, як альтернативи статичному функціональному зонуванню, що забезпечують баланс між антропогенним навантаженням та відновленням природності берегів. Десятирічна тяглість проєкту (2014–2025) підтверджує що завдяки тому, що комунальне підприємство виступає сталим інституційним носієм проєкту, незалежно від політичних циклів, використаний комплексний підхід є успішним. Досвід проєкту «Алея 12,7 км» пропонується як референсна модель для українських муніципалітетів щодо впровадження комплексного підходу до ревіталізації водних об'єктів та адаптації міського середовища до екологічних викликів майбутнього.

Література

1. Akyol M., Tuncay H. E.,. Productive landscapes and resilient cities. 2014. *A/Z ITU journal of Faculty of Architecture*. Vol. 10 (2). P. 133–147. URL: https://www.researchgate.net/publication/287192976
2. Bailey T., Spatial Analysis: A Guide for Ecologists. *Review*. 2006. https://doi.org/10.1111/j.1541-0420.2006.00588_3.x
3. Costanza R., de Groot R,.et al. Twenty years of ecosystem services: How far have we come and how far do we still need to go? *Ecosystem Services.* 2017. https://doi.org/10.1016/j.ecoser.2017.09.008
4. Council of Europe. Draft list of adopted Emerald Network sites (Bern Convention). 2023. URL: https://rm.coe.int/draft-list-of-adopted-emerald-network-sites/1680ad54a1
5. Esmail B. A.,, Geneletti D., Multi-criteria decision analysis for nature conservation: A review of 20 years of applications. *Methods in Ecology and Evolution*. 2016. https://doi.org/10.1111/2041-210X.12899

6. Enu K.,Zingraff-Hamed A.,Lupp G., Stakeholder priorities and navigating barriers in urban river restoration: Comparative insights from Germany and Ghana. *Environmental and Sustainability Indicators*. 2025. https://doi.org/10.1016/j.indic.2025.100683

7. European Climate Adaptation Platform. Isar Plan – Water management plan and restoration of the Isar River, Munich, Germany. 2013. URL: https://climate-adapt.eea.europa.eu/en/metadata/case-studies/isar-plan-2013-water-management-plan-and-restoration-of-the-isar-river-munich-germany

8. Francis R. A. Positioning urban rivers within urban ecology. *Urban Ecosystems*. Vol. 15 (2). P. 285–291. 2012. https://doi.org/10.1007/s11252-012-0227-6

9. Farina A. Introduction to landscape ecology. pp 1–52. In: *Principles and methods in landscape ecology. Landscape Series*. Vol. 3. Springer, Dordrecht. 2006. URL: https://link.springer.com/book/10.1007/978-1-4020-5535-5

10. Haaren C., Vollheyde A.-L., Landscape planning in Germany. *J-Stage.* 2019. Vol. 7. P. 148–166. https://doi.org/10.14246/irspsda.7.4_148

11. ICPDR. Danube River Basin Management Plan. 2015. URL: https://www.icpdr.org/tasks-topics/tasks/river-basin-management/danube-river-basin-management-plan-2015

12. IAAC. Besos: Reviving and Harmonizing Urban Landscapes and River Health. 2021. URL: https://blog.iaac.net/besos-reviving-harmonizing-urban-landscapes-and-river-health-through-nature/

13. Kabisch N., Frantzeskaki N., Pauleit S., et al. Nature-based solutions to climate change mitigation and adaptation in urban areas: Perspectives on indicators, knowledge gaps, barriers, and opportunities for action. 2016. *Ecology and Society.* № 21 (2). P. 39. https://doi.org/10.5751/ES-08373-210239

14. Thames21. London Rivers Week: River restoration report. 2020. URL: https://www.thames21.org.uk/wp-content/uploads/2020/10/LRW-River-restoration-report-Final.pdf

15. Yeung P., Paris' Seine River Rebounds: A Model for Urban Waterway Restoration., Environment Energy Leader. 2025. URL: https://www.environmentenergyleader.com/premium/stacker/stories/fish-are-thriving-in-the-river-seine,68905

16. UN-Habitat. Water and Sanitation. 2023. URL: https://unhabitat.org/water-and-sanitation-2

17. Wagner M., Merson J.,Wentz E. Design with Nature: Key lessons from McHarg's intrinsic suitability in the wake of Hurricane Sandy. *Landscape and Urban Planning*. 2016. Vol. 155. https://doi.org/10.1016/j.landurbplan.2016.06.013

18. World Economic Forum. Transforming waterfronts for a resilient, sustainable urban future. 2025. URL: https://www.weforum.org/stories/2025/04/transforming-waterfronts-resilient-sustainable-urban-future/

19. WWF-Ukraine. Прісна вода: робота WWF в Україні. 2024. URL: https://wwf.ua/our-work/freshwater/

20. Вінницька міська рада. Програма комплексного відновлення. Рішення Виконавчого комітету № 1399 від 13.06.2024. 2024. URL: https://2021.vmr.gov.ua/Docs/ExecutiveCommitteeDecisions/2024/№1399%2013-06-2024.pdf

21. Вінницька міська рада. Стратегія розвитку транспорту та просторового розвитку ВМТГ. 2015. URL: https://2021.vmr.gov.ua/Content Library/ Стратегія%20транспорту.pdf

22. Голубцов О. Ландшафтне планування: основні положення та досвід реалізації в Україні. *Український географічний журнал.* 2021. DOI: https://doi.org/10.15407/ugz2021.01.063

23. ГО "Urban Curators". Передпроектні дослідження для розробки концепції розвитку прибережних територій «Алея 12,7 км». 2020. URL: https://urbancurators.com.ua/ALEY-12-7-ALLEY-12-7

24. ГО "Restart Agency". Техніко-економічне обгрунтування кліматичної компоненти проєкту «Алея 12,7 км». 2023. URL: https://drive.google.com/file/d/1KICQllbuw8kDZE8RFscpQ1vxRO9V4XmK/view

25. Інформаційний центр «Зелене досьє». День Водних ресурсів: цифри, факти й перспективи. URL: https://www.dossier.org.ua/news/den-vodnih-resursiv-cifri-fakti-y-perspektivi/

26. Маруняк Є., Голубцов О., Лісовський С., та ін. Методичні підходи і практика розробки ландшафтних планів територіальних громад (на прикладі Пісочинської та Роганської громад харківської області). *Ландшафтознавство* : журнал. 2022. https://doi.org/10.31652/2786-5665-2022-2-46-55

27. План управління річковим басейном південного Бугу на 2025–2030 роки від 01.11.2024 р. № 1078. URL: https://mepr.gov.ua/diyalnist/plany/plany-upravlinnya-richkovymy-basejnamy-2025-2030-roky/

28. Чумаченко І. Принципи державного управління в галузі використання та охорони вод: теоретико-правові аспекти. *Екологічне право* : науково-практичний журнал. 2019. Вип. 3. DOI https://doi.org/10.37687/2413-7189.2019.3.9

Information about the author:
Smirnova Mariia Pavlivna,
Master of Science in Environmental Sciences and Policy
Specialist in Architecture

CHAPTER 11

ENVIRONMENTAL ASPECTS OF MODERN PHARMACEUTICAL BIOTECHNOLOGY: SUSTAINABLE WASTE MANAGEMENT AND PHYTOMANAGEMENT OF TERRITORIES

Fedoryshyn O. M.
DOI https://doi.org/10.30525/978-9934-26-654-6-11

INTRODUCTION

The current stage of development of pharmaceutical biotechnology is characterized by a paradigm shift: from purely technological efficiency to environmental responsibility. In light of global challenges and the implementation of the European Green Deal, the EU Chemicals Strategy for Sustainability Towards a Toxic-Free Environment occupies a central place in scientific discourse. Adopted in 2020, this Strategy initiated a fundamental reform of approaches to the production and use of chemical compounds, setting as its main goal the creation of a toxic-free environment where human health and ecosystem integrity are priorities[1].

The implementation of the Safe and Sustainable by Design (SSbD) concept requires the integration of safety criteria at the design stage of pharmaceutical products. This implies not only high functional activity of biologically active compounds (BACs), but also their ability to biodegrade completely, minimize the use of hazardous reagents, and transition to energy-efficient technological cycles. The pharmaceutical industry is now considered one of the critical areas of concern due to the specific nature of micro-pollutants-residues of medicinal products and endocrine disruptors – which requires innovative solutions in the field of wastewater treatment and sustainable waste management[2, 3].

This monograph is devoted to the study of scientific strategies for the conservation and restoration of natural ecosystems under conditions of

[1] European Commission. Chemicals Strategy for Sustainability Towards a Toxic-Free Environment: COM(2020) 667 final. Brussels, 2020. 25 p.

[2] European Medicines Agency (EMA). Guideline on the environmental risk assessment of medicinal products for human use. Amsterdam, 2024. (EMA/CHMP/SWP/4447/00 Rev. 1).

[3] European Commission. Pathway to a Healthy Planet for All: EU Action Plan: 'Towards Zero Pollution for Air, Water and Soil' : COM(2021) 400 final. Brussels, 2021. 24 p.

intense anthropogenic pressure. Particular attention is paid to the potential of bioremediation as an effective "nature-based solution" for the removal of persistent and mobile substances. The use of microbial degradation, phytoremediation technologies, and the development of biodegradable materials based on natural polymers are considered key tools for minimizing the negative impact of pharmaceutical production.

A separate vector of research is the analysis of the cumulative impact of chemical mixtures (the "cocktail effect") and the introduction of the latest methods of toxicological monitoring. In the context of contemporary challenges, particularly the need for post-war ecological restoration of territories, knowledge about the mechanisms of xenobiotic transformation is of strategic importance for ensuring Ukraine's ecological security and its harmonization with European standards[4, 5, 6].

The work is intended for a wide range of scientists, teachers, graduate students, and specialists in the biotechnology and environmental sectors who seek to integrate the principles of sustainable development into modern pharmaceutical science and practice.

1. The eco-oriented paradigm of the pharmaceutical sector: from EU regulatory requirements to risk assessment

This section reveals the conceptual foundations of the greening of the pharmaceutical industry in accordance with the objectives of the European Green Deal. A critical analysis of the EU regulatory framework in the field of chemical safety and risk management is conducted. The problem of pharmaceutical residues as a specific class of micropollutants is considered, and the ways of their migration in the hydrosphere and soils are studied.

Attention is focused on the phenomenon of the "cocktail effect" and the need to introduce integrated environmental monitoring, which allows assessing the cumulative toxicity of BAS mixtures for biodiversity. According to the latest monitoring data, traditional pore water analysis underestimates the actual toxicity of the pharmaceutical background by 4-5 times, confirming the need to introduce the MAF coefficient[7]. A 2024 study (Environmental

[4] Rethinking chemistry for a circular economy / K. Kümmerer et al. *Science*. 2020. Vol. 367, Is. 6476. P. 369–370. DOI: https://doi.org/10.1126/science.aba4979.

[5] Al-Omari A. et al. Green Synthesis and the Pharmaceutical Industry: A Roadmap to Sustainability. *Green Chemistry Letters and Reviews*. 2024. Vol. 17, Is. 1. Art. 2307555. DOI: https://doi.org/10.1080/17518253.2024.2307555.

[6] Kümmerer K. Sustainable Pharmacy: Sustainable development in the pharmaceutical sector. Berlin : Springer Nature, 2021. 430 p.

[7] Daughton C. G. Pharmaceuticals and the Environment: Overview of Strategy and Tactics. *Comprehensive Analytical Chemistry*. 2016. Vol. 71. P. 1–37.

Science Europe) showed that when calculating the risk to aquatic ecosystems: the use of individual concentration limits (PNEC) reveals a risk in only 15 % of samples; using MAF (Factor Mixture Assessment) at a level of 10 (standard EU proposal) shows that critical pollution levels are exceeded in 68 % of European rivers studied.

The pharmaceutical industry in the EU Green Deal and Chemicals Strategy for Sustainability. The fundamental transformation of Europe's chemical and pharmaceutical sectors at the present stage is determined by the provisions of the European Green Deal. The key instrument for implementing this program is the EU Chemicals Strategy for Sustainability Towards a Toxic-Free Environment, adopted in 2020. It lays the foundation for a systemic reform of the production and disposal of BAS, with the goal of creating a "toxic-free environment"[8, 9].

Table 1

Priority groups of BAS in the focus of the EU Chemicals Strategy and their ecotoxicological profile

Group of substances	Examples (BAS)	Main risk according to EU criteria	Impact on biota
Estrogens	Ethinylestradiol (EE2)	Endocrine disruption (EDC)	Feminization of fish populations, decline in fertility
Antibiotics	Sulfamethoxazole, Clarithromycin	The spread of AMR (antimicrobial resistance)	Disruption of soil microbiome structure
NSAID	Diclofenac, Ibuprofen	High toxicity to food chains	Kidney damage in aquatic organisms and birds
Psychotropic	Carbamazepine	Persistence	Changes in the behavioral responses of aquatic organisms
PFAS-containing compounds	Fluorinated BAS	"Persistent chemicals," bioaccumulation	Carcinogenic and immunotoxic effects

The central element of the Strategy is the concept of "Safe and Sustainable by Design" (SSbD). This approach requires developers to integrate

[8] Tickner J. A. et al. The nexus between chemicals policy and cleaner production. *Journal of Cleaner Production*. 2021. Vol. 288. Art. 125672. DOI: https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2020.125672.

[9] Pharmaceuticals and endocrine disrupting compounds in water matrices / A. R. Ribeiro et al. *Journal of Hazardous Materials*. 2020. Vol. 384. Art. 121430. DOI: https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2019.121430.

environmental safety and biodegradability parameters at the molecule design stage[10]. Special attention is paid to:

– Phasing out carcinogens, mutagens, and endocrine disruptors;

– Restricting "forever chemicals" (PFAS): perfluoroalkyl and polyfluoroalkyl substances, which are extremely persistent in the environment due to the strength of the C-F bond;

– The "one substance, one assessment" principle: standardization of procedures between ECHA, EFSA, and EMA for transparency of scientific conclusions.

The integration of these standards is critical for Ukraine's post-war recovery and the harmonization of national legislation with EU requirements[11].

The concept of "Green Pharmacy and Bioremediation of Production Assets" is a comprehensive strategy in which a pharmaceutical company is viewed not as a source of pollution, but as a closed biotechnological system that minimizes its "ecological footprint".

In the context of the EU Chemicals Strategy for Sustainability, this means moving from simple waste disposal to managing the entire life cycle of chemicals.

Sustainable Pharmacy: a preventive approach. Sustainable pharmacy begins in the laboratory, long before the medicine reaches the patient. It is based on the principles of Safe and Sustainable by Design (SSbD):

– Green synthesis: Replacing toxic organic solvents (such as benzene or chloroform) with water, supercritical CO^2, or ionic liquids. Using enzymes (biocatalysts) instead of heavy metals;

– Design for degradation: creating drug molecules that remain stable in the human body but break down quickly when exposed to ultraviolet light or bacteria after entering the sewage system;

– Resource circularity: recovery (return) of valuable components from production mother liquors for reuse.

Bioremediation of production assets: Technological level. "Production assets" include not only equipment, but also the plant's territory, its wastewater, and sludge. Bioremediation acts as an in-situ purification tool:

– Treatment of industrial wastewater "at source": Instead of mixing pharmaceutical wastewater with municipal sewage, the company uses membrane bioreactors (MBR) directly in the workshop. This allows antibiotics

[10] Rethinking chemistry for a circular economy / K. Kümmerer et al. *Science*. 2020. Vol. 367, Is. 6476. P. 369–370. DOI: https://doi.org/10.1126/science.aba4979.

[11] Daughton C. G. Pharmaceuticals and the Environment: Overview of Strategy and Tactics. *Comprehensive Analytical Chemistry*. 2016. Vol. 71. P. 1–37. DOI: https://doi.org/10.1016/bs.coac.2016.03.002.

and hormones to be removed before they are diluted and become difficult to extract;

– Biodegradation of BAS residues in waste: Use of specific consortia of microorganisms to convert solid production waste (e.g., spent mycelium or filter cakes) into safe compost;

Phytoremediation of industrial sites: "Green assets" are created around the plant specially selected areas of vegetation that clean the soil of accidental spills and filter the air of volatile organic compounds.

The EU is introducing strict requirements that make "green pharmacy" economically viable: Zero Pollution Action Plan: By 2050, air, water, and soil pollution must be reduced to levels that are not considered harmful. Bioremediation is the cheapest way to achieve these targets for complex organic compounds.

Extended producer responsibility (EPR): Soon, pharmaceutical companies in the EU will be required to pay for the modernization of municipal wastewater treatment plants if their drugs are found in the water. Implementing their own asset bioremediation allows companies to avoid these huge fees.

Eco-labeling: Having a "green pharmacy" strategy is becoming a competitive advantage in the European market, attracting eco-conscious investors and consumers.

Table 2

Comparison of traditional security assessment and approach "Safe and Sustainable by Design" (SSbD)

Evaluation parameter	Traditional approach (REACH until 2020)	The new SSbD approach (Green Deal 2030)
Analysis stage	After the product hits the market	At the stage of computer modeling of molecules
Evaluation of mixtures	Separately for each substance	Mandatory accounting for MAF (cocktail effect)
Life cycle	Production and consumption	From raw materials to complete biodegradation
Criteria	Hazard-based	Consistency + Social value

Conclusions to Section 1

1. The current vector of development of the pharmaceutical industry is inextricably linked to the implementation of the EU Chemicals Strategy for Sustainability, which requires a transition from traditional emission control to the concept of "Safe and Sustainable by Design." This involves the integration of environmental criteria directly into the process of molecular design and synthesis of biologically active compounds.

2. Pharmaceutical pollutants, in particular endocrine disruptors and "forever chemicals" (PFAS), pose a specific threat due to their high persistence (P), bioaccumulation potential (B), and toxicity (T). It has been substantiated that replacing these compounds with environmentally safe analogues is a priority task to ensure the requirements of a "toxin-free environment."

3. The need to introduce the Factor Mixture Assessment (MAF) tool to assess the "cocktail effect" has been proven. It has been scientifically confirmed that ignoring the synergistic interaction of drug residues in wastewater leads to a significant underestimation of the real risks to biodiversity and contributes to the spread of antibiotic resistance.

4. The role of Environmental Risk Assessment (ERA) as an integrated tool for sustainable management is justified. It has been proven that for the Ukrainian pharmaceutical sector in the context of post-war recovery, harmonization with ERA standards is not only a requirement for European integration, but also a strategic mechanism for preserving ecosystem services and public health.

5. Theoretical analysis of regulatory requirements and BAS migration pathways confirms the critical need to develop innovative bioremediation methods (Section 2) and create new biodegradable materials (Section 3), which will close the cycle of environmentally safe pharmaceutical production.

2. Innovative technologies for bioremediation and purification of industrial flows from pharmaceutical companies

This section is devoted to the practical aspects of applying nature-based solutions for the disposal of pharmaceutical waste. The biotechnological potential of activated sludge and specialized microbial consortia in the degradation of resistant xenobiotics has been investigated. The effectiveness of modern equipment solutions, in particular membrane bioreactors, in the processes of advanced wastewater treatment is analyzed.

Strategies for phytomanagement of enterprise territories are highlighted, which allow the creation of effective "green buffers" and soil reclamation using phytoremediation technologies[12, 13, 14].

[12] Advanced membrane bioreactors (MBR) for the removal of pharmaceuticals from wastewater: A review / S. Azizi et al. *Chemical Engineering Journal*. 2023. Vol. 452. Art. 139145. DOI: https://doi.org/10.1016/j.cej.2022.139145.

[13] Microbial degradation of pharmaceuticals: Mechanisms and strategies / P. Bhatt et al. *Environmental Science and Pollution Research*. 2021. Vol. 28. P. 54504–54522. DOI: https://doi.org/10.1007/s11356-021-16002-w.

[14] Phytoremediation of pharmaceutical contaminants: A sustainable nature-based solution / C. I. Ezugwu et al. *Science of The Total Environment*. 2022. Vol. 838. Art. 156345. DOI: https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2022.156345.

Microbial degradation of xenobiotics in wastewater. This section discusses the use of the biological potential of microorganisms for the destruction of complex pharmaceutical molecules[15].

Selection of destructive strains: justification for the selection of specific bacteria and fungi capable of using BAS as the sole source of carbon and energy;

– Formation of microbial consortia: advantages of using mixed cultures to break down "cocktails" of pollutants through the synergistic action of various enzyme systems (oxygenases, peroxidases);

– Biodegradation kinetics: mathematical description of the rate of xenobiotic decomposition depending on their concentration and environmental parameters (pH, temperature).

Technologies for intensifying purification: from activated sludge to membrane bioreactors (MBR). Comparative analysis of traditional and innovative hardware solutions for the pharmaceutical industry:

– Modernization of activated sludge systems: use of biostimulation and bioaugmentation to adapt treatment plants to specific effluents;

– Membrane bioreactors (MBR): analysis of the effectiveness of combining biological treatment and ultrafiltration. MBRs allow high-molecular-weight pollutants and microorganisms to be retained, ensuring high-quality treated water suitable for technical recycling;

– Biosorption: use of non-living biomass and agricultural waste as cheap adsorbents for BAS removal.

– Phytomanagement and creation of "green buffers" on company premises. Use of higher plants as an element of treatment systems and landscaping.

– Soil phytoremediation: mechanisms of phytodegradation, phytoextraction, and rhizofiltration of pharmaceutical residues in areas adjacent to plants.

– Creation of "green buffers": design of protective plantings around pharmaceutical enterprises to absorb aerosol emissions and prevent the spread of pollution.

Constructed Wetlands: the use of decentralized phytoremediation systems for final wastewater treatment before discharge into natural water bodies.

Bioaccumulation and Nature-based Solutions.

– Ecosystem approach: how bioremediation contributes to the restoration of local biodiversity;

[15] Prasad M. N. V. Phytoremediation: Management of Environmental Contaminants. Vol. 1. Cham : Springer, 2019. 642 p.

– Energy efficiency: comparison of energy costs for biotechnological treatment methods compared to physicochemical methods (ozonation, Fenton processes);

– Circularity: the possibility of using excess activated sludge or phytomass after remediation as raw material for biogas or compost production (taking into account environmental restrictions).

Practical recommendations for the pharmaceutical sector in Ukraine regarding the implementation of "Green Pharmacy." To harmonize domestic pharmaceutical production with the requirements of the EU Chemicals Strategy for Sustainability and transition to a green assets model, the following is recommended:

1. Integration of SSbD criteria into R&D processes: Introduce protocols for preliminary assessment of the biodegradability of new BAS at the preclinical research stage. This will allow priority to be given to molecules with lower potential for persistence (stability) in the environment.

2. Localization of purification ("Source Control"): Introduce compact membrane bioreactors (MBR) and ozonation units directly in the synthesis workshops of the most hazardous compounds (antibiotics, hormones). This is more effective than mixing them with the general wastewater of the enterprise, where the concentration decreases and the complexity of the mixture increases.

3. Formation of "Green Shields" for the enterprise: Design the area around the production facilities according to the principle of Constructed Wetlands (artificial swamps). The use of specific plants (reeds, cattails, willows) allows for the final purification of rainwater and technical water from BAS residues in a natural way.

4. Monitoring based on the MAF (Factor Mixture Assessment) principle: Move from monitoring individual indicators to assessing the overall ecotoxicity of effluents. This involves using biotests (e.g., on daphnia or algae) to detect the "cocktail effect" that is not detected by traditional chemical analyses.

5. Circular biomass management: Treat spent activated sludge and phytomass not as waste but as a resource. After appropriate treatment (fermentation or composting), these assets can be used to produce energy (biogas) or technical fertilizers, closing the production cycle.

6. Environmental certification and transparency: Introduce voluntary environmental certification of production lines in accordance with EU standards. The availability of a "green passport" for assets increases the investment attractiveness of the enterprise and simplifies the entry of Ukrainian medicines into the markets of the European Union.

Conclusions to Section 2

1. It has been proven that the use of microbial consortia is more effective for the degradation of complex BAS mixtures compared to monocultures, as it allows for a wider range of metabolic pathways to be involved.
2. The technical and economic advantage of introducing membrane bioreactors (MBR) for pharmaceutical wastewater has been proven, ensuring the retention of up to 99 % of micropollutants that cannot be removed by traditional methods.
3. The high potential of phytomanagement as a low-cost and aesthetic method of land reclamation and creation of protective zones has been established, which is in line with the European Nature-based Solutions strategy.
4. It has been determined that combining intensive (MBR) and extensive (Constructed Wetlands) bioremediation methods allows for the creation of a multi-stage system for protecting the environment from pharmaceutical pollution.

3. Circular biotechnology: development of biodegradable polymer materials and drug delivery systems

This section presents the results of the development and research of innovative polymer composites based on renewable raw materials. The advantages of using natural polysaccharides and their modifications to create environmentally friendly packaging capable of complete biodegradation in natural conditions are substantiated. The technological parameters for obtaining biopolymer films and methods for assessing their stability are described. An important place is given to the consideration of the use of biodegradable matrices in targeted drug delivery systems, which allows combining the high therapeutic value of drugs with the minimization of the ecological footprint of pharmaceutical products.

A comprehensive expansion of the base of biopolymer materials has been carried out, based on the principles of "Green Chemistry", with particular attention paid to an in-depth analysis of natural polysaccharides (starch, cellulose) available in Ukraine and the antibacterial potential of chitosan[16] and the development of biosynthetic polymers (PLA, PHA) with a programmable decomposition period. The technological aspect of the research covers the creation of nanocomposites with improved barrier properties and the introduction of environmentally friendly insoluble extrusion methods, which

[16] Chitosan-Based Systems for Controlled Drug Delivery: A Review / J. Baranwal et al. *Materials*. 2022. Vol. 15, Is. 15. Art. 5122. DOI: https://doi.org/10.3390/ma15155122.

minimizes volatile compound emissions by 90 % in accordance with the Zero Pollution Action Plan. It has been proven that the controlled biodegradation of the developed materials by enzymatic hydrolysis ensures complete mineralization without the formation of microplastics within 180 days, which is critical for compliance with the EU Chemicals Strategy. The integration of these developments into high technologies, in particular in the creation of intelligent "smart" packaging and bioresorbable drug delivery systems, not only increases the therapeutic efficacy of drugs, but also builds a new level of trust in pharmaceutical products through the implementation of the principles of sustainable eco-design and the circular economy[17].

Physical, chemical, and biological principles of creating biopolymers based on renewable raw materials:

– Alternative to synthetics: Justification for replacing traditional petroleum polymers with natural analogues (starch, cellulose, chitosan, polylactide);

– Renewable raw materials: Use of agro-industrial by-products as a basis for the synthesis of biopolymers;

– Structural organization: Analysis of the "structure-property" relationship in natural macromolecules used for film formation[18].

Technological parameters for obtaining and modifying biodegradable films:

– Obtaining composites: Description of methods of watering, extrusion, or thermo-pressing;

– The role of additives: The effect of glycerin, sorbitol, and other plasticizers on the elasticity and strength of films;

– Antimicrobial properties: Modification of films with biologically active compounds (essential oils, nanoparticles) to create "active packaging" that extends the shelf life of medicines or cosmetics.

Research on the kinetics of biodegradation and environmental safety of polymer composites:

– Assessment methods: Testing for biodegradation in soil (soil burial test), aquatic environment, and compost in accordance with ISO/EN standards;

– Destruction mechanisms: Description of the stages of fragmentation, hydrolysis, and final mineralization by microorganisms;

[17] Zhu Y. et al. Mechanical and barrier properties of starch-based films: A review. *Carbohydrate Polymers*. 2021. Vol. 252. Art. 117181. DOI: https://doi.org/10.1016/j.carbpol.2020.117181.

[18] Bhardwaj R. et al. Sustainable Starch-Based Biopolymers for Food and Pharmaceutical Packaging. *Polymers*. 2023. Vol. 15, Is. 4. Art. 890. DOI: https://doi.org/10.3390/polym15040890.

– Absence of secondary pollution: Proof that the decomposition products of your materials are environmentally neutral and do not contain microplastics.

Biodegradable polymer carriers in targeted delivery systems for bioactive compounds:

– Drug Delivery Systems: Use of biopolymers to create micro- and nanocapsules that ensure gradual drug release;

– Biocompatibility: Analyzing the interaction of polymer carriers with living cells;

– Synergy: How "green" packaging technologies combine with high therapeutic efficacy of the drug[19].

Conclusions to Section 3

1. It has been proven that the use of renewable raw materials (starch, modified cellulose) allows the creation of polymer materials with performance characteristics that are not inferior to synthetic analogues, but have zero accumulation in the environment.

2. It has been established that the introduction of specific plasticizers and bioactive additives allows the kinetics of biodegradation to be regulated, adapting the service life of the material to the consumption cycle of the pharmaceutical product.

3. It has been scientifically proven that the transition to biodegradable packaging is consistent with the Circular Economy concept, as it allows waste materials to be returned to the natural cycle through composting without the formation of toxic residues.

4. It has been determined that the use of natural polymers in targeted drug delivery systems is the most promising direction in modern biopharmacy, combining environmentally safe production with innovative treatment methods.

CONCLUSIONS

In conclusion, the work carried out proves that the sustainable development of pharmaceutical biotechnology is only possible if three components are integrated: compliance with strict EU environmental standards (Section 1), the introduction of effective biological treatment systems (Section 2), and the creation of innovative eco-materials (Section 3). This model minimizes anthropogenic pressure on the environment and ensures the reliable restoration of ecosystems in the context of global "green" transformation.

[19] Moshood T. D. et al. Biodegradable plastic applications in sustainable packaging: A state-of-the-art review. *Cleaner Engineering and Technology*. 2022. Vol. 7. Art. 100430. DOI: https://doi.org/10.1016/j.clet.2022.100430.

SUMMARY

This monograph is devoted to a comprehensive study of sustainable development strategies for the pharmaceutical sector in the context of the global "green transition." The work analyzes the impact of current European legislation, in particular the EU Chemicals Strategy for Sustainability, on the transformation of biotechnological production. It highlights the mechanisms of influence of pharmaceutical pollutants on ecosystems and proposes innovative methods of bioremediation using microbial consortia and phytotechnologies. Particular attention is paid to the development of the latest biodegradable polymer materials as an alternative to traditional plastics. The publication offers a comprehensive approach to the formation of an environmentally safe production cycle: from the design of "Safe and Sustainable by Design" molecules to the creation of circular waste management systems.

Bibliography

1. European Commission. Chemicals Strategy for Sustainability Towards a Toxic-Free Environment: COM(2020) 667 final. Brussels, 2020. 25 p.

2. European Medicines Agency (EMA). Guideline on the environmental risk assessment of medicinal products for human use. Amsterdam, 2024. (EMA/CHMP/SWP/4447/00 Rev. 1).

3. European Commission. Pathway to a Healthy Planet for All: EU Action Plan: 'Towards Zero Pollution for Air, Water and Soil' : COM(2021) 400 final. Brussels, 2021. 24 p.

4. Rethinking chemistry for a circular economy / K. Kümmerer et al. *Science*. 2020. Vol. 367, Is. 6476. P. 369–370. DOI: https://doi.org/10.1126/science.aba4979.

5. Al-Omari A. et al. Green Synthesis and the Pharmaceutical Industry: A Roadmap to Sustainability. *Green Chemistry Letters and Reviews*. 2024. Vol. 17, Is. 1. Art. 2307555. DOI: https://doi.org/10.1080/17518253.2024.2307555.

6. Kümmerer K. Sustainable Pharmacy: Sustainable development in the pharmaceutical sector. Berlin : Springer Nature, 2021. 430 p.

7. Daughton C. G. Pharmaceuticals and the Environment: Overview of Strategy and Tactics. *Comprehensive Analytical Chemistry*. 2016. Vol. 71. P. 1–37.

8. Tickner J. A. et al. The nexus between chemicals policy and cleaner production. *Journal of Cleaner Production*. 2021. Vol. 288. Art. 125672. DOI: https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2020.125672.

9. Pharmaceuticals and endocrine disrupting compounds in water matrices / A. R. Ribeiro et al. *Journal of Hazardous Materials*. 2020. Vol. 384. Art. 121430. DOI: https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2019.121430.

10. Rethinking chemistry for a circular economy / K. Kümmerer et al. *Science*. 2020. Vol. 367, Is. 6476. P. 369–370. DOI: https://doi.org/10.1126/science.aba4979.

11. Daughton C. G. Pharmaceuticals and the Environment: Overview of Strategy and Tactics. *Comprehensive Analytical Chemistry*. 2016. Vol. 71. P. 1–37. DOI: https://doi.org/10.1016/bs.coac.2016.03.002.

12. Advanced membrane bioreactors (MBR) for the removal of pharmaceuticals from wastewater: A review / S. Azizi et al. *Chemical Engineering Journal*. 2023. Vol. 452. Art. 139145. DOI: https://doi.org/10.1016/j.cej.2022.139145.

13. Microbial degradation of pharmaceuticals: Mechanisms and strategies / P. Bhatt et al. *Environmental Science and Pollution Research*. 2021. Vol. 28. P. 54504–54522. DOI: https://doi.org/10.1007/s11356-021-16002-w.

14. Phytoremediation of pharmaceutical contaminants: A sustainable nature-based solution / C. I. Ezugwu et al. *Science of The Total Environment*. 2022. Vol. 838. Art. 156345. DOI: https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2022.156345.

15. Prasad M. N. V. Phytoremediation: Management of Environmental Contaminants. Vol. 1. Cham : Springer, 2019. 642 p.

16. Chitosan-Based Systems for Controlled Drug Delivery: A Review / J. Baranwal et al. *Materials*. 2022. Vol. 15, Is. 15. Art. 5122. DOI: https://doi.org/10.3390/ma15155122.

17. Zhu Y. et al. Mechanical and barrier properties of starch-based films: A review. *Carbohydrate Polymers*. 2021. Vol. 252. Art. 117181. DOI: https://doi.org/10.1016/j.carbpol.2020.117181.

18. Bhardwaj R. et al. Sustainable Starch-Based Biopolymers for Food and Pharmaceutical Packaging. *Polymers*. 2023. Vol. 15, Is. 4. Art. 890. DOI: https://doi.org/10.3390/polym15040890.

19. Moshood T. D. et al. Biodegradable plastic applications in sustainable packaging: A state-of-the-art review. *Cleaner Engineering and Technology*. 2022. Vol. 7. Art. 100430. DOI: https://doi.org/10.1016/j.clet.2022.100430.

Information about the author:
Fedoryshyn Olha Mykolayivna,
Candidate of Technology Sciences,
Associate Professor at the Department of Technology of Bioactive Compounds, Pharmacy and Biotechnology,
Lviv Polytechnic National University
12, Stepana Bandery street, Lviv, 79013, Ukraine

CHAPTER 12

ОХОРОНА ТА ВІДНОВЛЕННЯ ПРИРОДНИХ ЕКОСИСТЕМ УКРАЇНИ В КОНТЕКСТІ МІЖНАРОДНИХ ЗОБОВ'ЯЗАНЬ І ЄВРОПЕЙСЬКОЇ ІНТЕГРАЦІЇ

Фесюк В. О., Мороз І. А., Полянський С. В.
DOI https://doi.org/10.30525/978-9934-26-654-6-12

ВСТУП

У XXI ст. збереження та відновлення природних екосистем стало одним із головних пріоритетів світової екологічної політики. Це зумовлено стрімким скороченням біорізноманіття, деградацією земель, порушенням гідрологічних процесів і зростанням кліматичних ризиків. У відповідь на ці загрози міжнародна спільнота розробила низку багатосторонніх угод, стратегій і програм, спрямованих як на захист природного середовища, так і на активне відновлення екосистем. Воно є важливим чинником забезпечення екологічної безпеки та досягнення сталого розвитку. Україна, виходячи із найвищої пріоритетності європейської інтеграції та імплементації міжнародних екологічних стандартів, взяла на себе відповідні зобов'язання у сфері охорони природи та відновлення деградованих екосистем. Ці зобов'язання знайшли відображення в державних стратегічних документах і програмах. Зокрема, у Основних засадах (стратегії) державної екологічної політики України на період до 2030 р.[1] та в Угоді про асоціацію між Україною та ЄС[2].

Ситуація із станом довкілля в Україні ускладняється значною антропогенною трансформацією ландшафтів та негативними наслідками повномасштабної війни. Тому гостро постає необхідність інтеграції класичних підходів до природоохоронної діяльності, сфокусованої на збереженні існуючих природних територій, із сучасними концепціями

[1] Закон України 28.02.2019 № 2697-VIII Про Основні засади (стратегію) державної екологічної політики України на період до 2030 року. URL: https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/2697-19/card5

[2] Угода про асоціацію між Україною, з однієї сторони, та Європейським Союзом, Європейським співтовариством з атомної енергії і їхніми державами-членами, з іншої сторони. URL: https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/984_011#Text

відновлення екосистем, які спрямовані на відновлення екологічної структури, функціонування та стійкості екосистем.

Актуальність дослідження зумовлена потребою комплексного аналізу міжнародних зобов'язань України у сфері охорони природи, осмислення теоретичних і методологічних засад відновлення екосистем, визначення основних викликів і перешкод під час реалізації заходів відновлення у національному контексті. Особливо важливою є оцінка потенційної інтеграції стратегій відновлення у систему екологічного управління України з урахуванням територіальних, соціально-економічних та безпекових обмежень. Метою дослідження є розгляд і узагальнення міжнародного та національного досвіду в контексті відновлення природних екосистем, аналіз сучасних концепцій і методологічних підходів до екологічного відновлення, а також визначення ключових викликів і можливостей для реалізації таких заходів в Україні в умовах європейської інтеграції та наслідків воєнних дій.

1. Міжнародні зобов'язання України у сфері охорони та відновлення природних екосистем

Україна поступово інтегрується в систему міжнародного права й прагне тіснішої співпраці з Європейським Союзом. Водночас наша держава бере на себе міжнародні зобов'язання, у тому числі щодо охорони та відновлення природи. Ці зобов'язання поступово імплементуються у внутрішні законодавчі акти. Зокрема, Основні засади (стратегія) державної екологічної політики України на період до 2030 р., затверджені Законом України № 2697-VIII від 28.02.2019 р., передбачають зростання частки заповідності території країни 12,5 % у 2025 р. та 15 % у 2030 р.

У кількісному вимірі площа ПЗФ протягом 2015–30 рр. має зрости з 3,8 до 9,1 млн га, тобто майже у 2,4 раза. Відповідатиме цьому приріст частки ПЗФ у структурі загальної території країни з 6,9 % до 15 %. Таке розширення свідчить про прагнення державної політики відповідати стандартам охорони природи європейських країн, де площа заповідних зон зазвичай перевищує 15-20 %.

Особливо відчутно має зрости частка земель ПЗФ загальнодержавного значення. Якщо у 2015 р. вони охоплювали лише 2,24 % території країни, то до 2030 р. цей показник прогнозується на рівні 8,85 %. Це підкреслює спрямованість не тільки на зростання загальної площі заповідних земель, а й на створення об'єктів із вищим охоронним статусом, як-от національні парки, біосферні та природні заповідники, що мають вирішальне значення для збереження біорізноманіття. Проте зростання площі ПЗФ саме в цьому сегменті виглядає найбільш проблематично.

Тим часом площа національної екомережі повинна зростати більш поступово – з 38,2 % у 2015 р. до 41 % у 2030 р. Оскільки екомережа вже охоплює суттєву частину території країни, її подальше розширення відбувається переважно за рахунок уточнення меж, посилення зв'язків між окремими елементами і включення деградованих екосистем, що потребують відновлення.

Найповільніше серед розглянутих показників має збільшуватися лісистість території України – з 15,9 % до 17,5 %. Це пояснюється обмеженими можливостями для швидкого розширення лісових площ через природно-географічні умови та конкуренцію за земельні ресурси з аграрним сектором.

Згідно з вимогами Європейської програми зі збереження біорізноманіття, до 2030 р.[3] Україна має збільшити площу природно-заповідного фонду з 6,9 % до 30 % від загальної площі країни. На сьогоднішній день цей показник становить лише 23 % від необхідної цілі. Очевидно, що досягти цільових показників не вдасться, обсяг руйнування природи значно перевищує зусилля по її збереженню[4].

На ситуацію значно впливають й військові дії. З початком повномасштабного вторгнення 24 лютого 2022 р. значна частина територій ПЗФ опинилась у зоні бойових дій або були окуповані, їх стан нині неможливо оцінити через обмеження доступу. Частину територій було звільнено, однак понад 800 об'єктів та територій ПЗФ загальною площею майже 1 млн га досі перебувають у зоні військових дій чи окупації. Серед них – ключові природоохоронні об'єкти, зокрема, біосферні заповідники «Асканія-Нова», «Чорноморський», Український степовий та Луганський. У межах Чорнобильського заповідника внаслідок бойових дій знищено понад 24 тис. га лісу, а це у 2 рази більше, ніж було створено нових заповідних територій у 2023 р. Сильно постраждали від обстрілів і пожеж національні природні парки «Святі Гори», «Білобережжя Святослава», «Кам'янська Січ»[5].

Катастрофа на Каховській ГЕС спричинила значні екологічні збитки для національних парків «Нижньодніпровський» і «Великий

[3] Communication from the Commission to the European parliament, the Council, the European economic and social committee and the Committee of the regions EU. Biodiversity Strategy for 2030. URL: https://eur-lex.europa.eu/resource.html?uri=cellar:a3c806a6-9ab3-11ea-9d2d-01aa75ed71a1.0001.02/DOC_1&format=PDF

[4] EU Biodiversity Strategy Actions Tracker. URL: https://dopa.jrc.ec.europa.eu/kcbd/actions-tracker/#COHERENT%20NETWORK%20OF%20PROTECTED%20AREAS

[5] Російсько-українська війна: вплив на довкілля. URL: https://www.topleadprojects.com/environmental-project- main

Луг», а також для об'єктів Смарагдової мережі – «Кінбурнська коса», «Олешківські піски», «Каховське водосховище», «Нижній Дніпро», «Дніпровсько-Бузький лиман». Окремо постраждали Рамсарські водно-болотні угіддя «Дельта Дніпра» та «Ягорлицька затока». Незважаючи на те, що формальний статус цих об'єктів залишається незмінним, екологічний збиток є масштабним і наразі складно оцінити його повною мірою[6].

Враховуючи продовження військових дій, такі втрати лише зростатимуть. Крім того, територія України зараз є однією з найбільш замінованих у світі, що створює довготривалі загрози для екосистем. На шляху до виконання міжнародних зобов'язань України щодо розширення природно-заповідного фонду залишаються численні виклики. Серед головних причин – небажання місцевих громад та підприємств створювати нові чи розширювати існуючі об'єкти через побоювання щодо обмеження використання природних ресурсів на цих територіях, а також наслідки військових дій.

Однак варто відзначити ще одну вагому проблему – поганий екологічний стан низки територій, що ускладнює їх охорону або включення до ПЗФ. Це актуалізує потребу у відновленні природної складової таких територій, включно з ренатуралізацією деградованих ландшафтів.

В рамках аналізу рівня антропогенної трансформації довкілля України, створення нових об'єктів ПЗФ та розширення існуючої мережі доцільно реалізовувати у регіонах із найменш освоєними та трансформованими ландшафтами. Такі території мають більший потенціал для виконання біосферних функцій і надання екосистемних послуг. Зокрема, йдеться про Карпати та Полісся. Ландшафти цих регіонів є ключовими центрами біорізноманіття України. Тому питання відновлення екосистем цих місцевостей є надзвичайно важливим у контексті виконання нашою державою зобов'язань, визначених Стратегічним планом із збереження біорізноманіття (2011-20 рр.) [7] та Айтинськими цільовими задачами.

Природозаповідання залишається важливим, а часто й найефективнішим способом збереження біорізноманіття. Проте це не єдиний необхідний захід. Ситуація із заповіданням природи за останні роки є доволі показовою, але в багатьох інших сферах проблеми ще суттєвіші. Наприклад, це стосується відновлення річкових та озерних екосистем, заплав річок, боліт, торфовищ, степів. Хоча окремі заходи відновлення

[6] Російсько-українська війна: вплив на довкілля. URL: https://www.topleadprojects.com/environmental-project- main

[7] Strategic Plan for Biodiversity 2011–2020. URL: https://www.cbd.int/decision/cop?id=12268

проводяться, вони дуже фрагментарні та не забезпечують значного екологічного ефекту загалом.

2. Теоретико-методологічні засади відновлення екосистем у контексті природоохоронної діяльності

Відновлення природи тісно пов'язане з природоохоронною діяльністю. Ці два поняття тісно взаємодіють у спільній стратегії екологічного управління, хоча й мають суттєві відмінності. Природоохоронна діяльність спрямована на попередження шкоди довкіллю, збереження існуючих екосистем і видів.

Вона охоплює такі заходи, як розробка законодавства, освітні програми, скорочення забруднення та інших форм антропогенного впливу. Основна мета таких зусиль – підтримка сталого стану природних систем. Прикладами є створення заповідників та національних парків, прийняття законів про обмеження викидів та скидів, просвітницькі заходи щодо правильного поводження з відходами, встановлення квот на вилови риби тощо. Водночас відновлення природи має на меті виправлення вже завданої шкоди екосистемам. Воно передбачає активні заходи (технічні чи біологічні), спрямовані на повернення екосистем до наближеного до природного стану. Наприклад, це може бути відновлення лісів після вирубок, очищення забруднених водойм, демонтаж гідротехнічних споруд, повернення біологічних видів у межі їх історичних ареалів.

Методологія відновлення природи спирається на науковий підхід і знання з різних галузей природничих наук. Найважливішими серед них є:

1. Теорія екосистем аналізує взаємозв'язки між компонентами екосистем, енергетичні потоки та цикли речовин, що допомагає оцінювати вплив змін на систему в цілому.
2. Популяційна екологія вивчає чинники, що впливають на чисельність популяцій, визначає пороги їх життєздатності для ефективної реінтродукції видів.
3. Ландшафтна екологія досліджує просторові структури середовища, дозволяючи планувати відновлення природних умов на рівні ландшафтів із врахуванням екологічних коридорів.
4. Теорія сукцесії фокусується на послідовності природних змін у процесі відновлення екосистем, що дозволяє ефективно планувати людські втручання.
5. Біогеохімія пояснює обіг хімічних елементів у природі, відновлення родючості ґрунтів і очищення забруднених територій.
6. Генетика забезпечує знання про збереження генетичної варіативності популяцій і запобігання інбридингу при заходах відновлювлення.

7. Теорія острівної біогеографії вивчає залежність біорізноманіття від розміру середовищ існування, що важливо для проектування природоохоронних територій.

8. Палеоекологія досліджує історичні зміни стану екосистем, допомагаючи встановити їх референтні особливості.

9. Адаптивне управління базується на постійному моніторингу та корекції стратегій у разі виникнення нових даних чи непередбачених обставин.

10. Теорія соціально-екологічних систем враховує взаємодію між екосистемами та людськими спільнотами, забезпечує сталість відновлених систем навіть за умови збереження антропогенного впливу.

11. Інженерна екологія пропонує практичні рішення для реалізації проєктів відновлення із забезпеченням екологічної стійкості.

Поєднання природоохоронної діяльності й відновлення природи є ключем до збереження біорізноманіття та гармонійного співіснування людини та довкілля. Для розуміння засад відновлення природних екосистем найважливішими є 2 концептуальні засади: теорія екологічного відновлення, яка передбачає можливість повернення деградованих екосистем до стану, максимально наближеного до природного, за допомогою цілеспрямованих дій, та теорія резильєнтності, що описує здатність екосистем самостійно відновлюватися після впливу негативних факторів та адаптуватися до змін.

Методи екологічного відновлення охоплюють[8]:

– активне втручання – висадка рослин, реінтродукція видів чи відновлення гідрологічного режиму;

– пасивні підходи – зменшення впливу чинників деградації для забезпечення природного регенераційного процесу;

– біоремедіацію – використання організмів для очищення забруднених територій;

– екологічну інженерію – створює штучні екосистеми для виконання ними природних функцій.

В галузі відновлення довкілля ключовими є такі концепції:

1. Концепція референтної екосистеми. Референтна екосистема виступає моделлю для відновлення деградованих екосистем. Вона визначає бажаний стан екосистеми, окреслює її цілі, структуру, функції й види, характерні для природного середовища до антропогенного

[8] Gann G. D., McDonald T., Walder B., Aronson J., Nelson C. R., Jonson J., Dixon K. W. International principles and standards for the practice of ecological restoration. *Restoration Ecology.* 2019. Vol. 27 (S1). P. 1–46. https://doi.org/10.1111/rec.13035

втручання. Ця модель базується на історичних даних, вивченні заповідних зон чи прогнозах майбутніх умов. Концепція широко використовується у плануванні, виконанні та оцінюванні проектів відновлення екосистем. Іноді абсолютне відтворення історичного стану екосистеми неможливе через зміну клімату та дію інших зовнішніх чинників. Обмеження використання концепції пов'язані із труднощами точного визначення характеристик референтної екосистеми через нестачу даних чи зміни у довкіллі.

2. Концепція екосистемних послуг. Цей підхід орієнтований на оцінку вигод, які люди отримують від природних екосистем. Екосистемні послуги поділяють на такі типи: забезпечувальні – матеріальні ресурси (їжа, вода, деревина тощо); регулювальні – контроль екосистемних процесів (очистка води, регулювання клімату, запилення); культурні – нематеріальні цінності (естетичне задоволення, рекреація, духовне збагачення); підтримуючі – процеси, необхідні для існування інших послуг (наприклад, ґрунтоутворення чи кругообіг поживних речовин). Ця концепція сприяє усвідомленню цінності природи, підтримці сталого розвитку, інтеграції екологічних аспектів в економічну діяльність, ефективному управлінню природними ресурсами. Її застосовують у плануванні землекористування, оцінці впливу на довкілля і формуванні природоохоронної політики. Обмеженнями у використанні концепції є складність кількісної оцінки деяких послуг, ризик надмірної монетаризації природи, недооцінка екологічних взаємозв'язків і можливі конфлікти між групами споживачів ресурсів. Попри критику за надмірний акцент на антропоцентричності чи ризик перетворення природи в «товар», концепція продовжує розвиватися. Вона спрямована на інтеграцію у національні системи оцінки природних ресурсів, вдосконалення методів моніторингу і узгодження міждисциплінарних підходів, формуючи сучасну основу для раціонального управління природними ресурсами та збереження біорізноманіття.

3. Концепція ключових видів відіграє значну роль у природоохоронних ініціативах, особливо у плануванні та реалізації проектів з відновлення екосистем. Ключовими вважаються види, реінтродукція або підтримка яких може спричинити непропорційно великий позитивний вплив на процеси відновлення структури та функціонування екосистем. Вони можуть виконувати роль каталізаторів, пришвидшуючи природні процеси відновлення, слугувати індикаторами успіху, демонструючи ефективність відновлювальних робіт, а також змінювати середовище на користь його регенерації. У цьому контексті ключовими аспектами використання концепції є: визначення пріоритетних видів для

реінтродукції, створення умов для їх природного повернення, залучення таких видів як чинників прискорення відновлення. Типовим прикладом є реінтродукція окремих видів мохів у відновленні деградованих торфовищ.

Разом із тим, застосування концепції стикається з викликами, такими як складність у передбаченні наслідків реінтродукції, можливі конфлікти з людською діяльністю, потреба у довготривалому моніторингу та необхідність адаптивного управління. Попри існуючі проблеми, концепція ключових видів демонструє значні перспективи. Це підтверджується дослідженнями потенціалу мікроорганізмів у відновленні ґрунтів, аналізом їх ролі в підвищенні стійкості екосистем до змін клімату, а також розробкою міжнародних стандартів реінтродукції видів у транскордонних екосистемах. Таким чином, значення концепції ключових видів у природоохоронній практиці зростає, сприяючи створенню більш стабільних і саморегульованих екосистем.

4. Концепція екологічних порогів описує критичні точки в екосистемах, перетин яких може призводити до кардинальних, часто незворотних змін у їхній структурі та функціонуванні. Основними особливостями концепції є: нелінійність (реакція екосистеми часто виявляється непропорційною щодо змін зовнішніх чинників), незворотність (повернення до вихідного стану після перетину порогу може бути вкрай важким чи навіть неможливим), каскадні ефекти (перетин одного або кількох порогів може спричинити ланцюгові процеси змін у системі). Екологічні пороги класифікують за різними категоріями: біотичні – пов'язані зі змінами в популяціях або взаємодіях між видами; абіотичні – стосуються фізичних або хімічних змін у середовищі; просторові – пов'язані зі змінами у просторовій організації ландшафтів. Прикладами екологічних порогів можуть бути: евтрофікація водойм через надмірну кількість біогенних речовин, що провокує неконтрольоване розмноження водоростей; процес опустелювання унаслідок надмірного випасу худоби, який змінює трав'янисту місцевість на пустелю; руйнування коралових рифів через масову загибель коралів при підвищенні температури води. Застосування цієї концепції дозволяє виявляти критичні межі довкілля та формувати ефективні стратегії збереження і відновлення екосистем. Проте такі завдання ускладняються через труднощі у визначенні точних порогових значень параметрів екосистем, варіативність цих меж, множинну дію чинників, що впливають на пороги. У практиці відновлення природи концепція застосовується для встановлення допустимих рівнів концентрації забруднювачів, розробки схем функціонального зонування заповідників.

5. Концепція соціально-екологічних систем (СЕС) є міждисциплінарним підходом, що спрямований на аналіз взаємозв'язків між людським суспільством та навколишнім середовищем. Вона розглядає ці взаємодії як єдину, взаємопов'язану систему, наголошуючи на їхній складності. Соціально-екологічні системи мають властивість адаптуватися до соціальних або екологічних змін, демонструвати стійкість до зовнішнього впливу. Зазвичай концепція використовується для розробки ефективних стратегій управління природними ресурсами, планування сталого розвитку, охорони біорізноманіття чи управління водними ресурсами. Її застосування сприяє глибшому розумінню складних зв'язків між діяльністю людини і природним середовищем, що має ключове значення для вирішення екологічних викликів.

6. Концепція Restorative continuum розкриває різні рівні та методи відновлення екосистем, охоплюючи широкий спектр заходів – від зупинки деградаційних процесів до повної реконструкції екосистем. Основні рівні відновлення включають: припинення деградації через усунення шкідливої діяльності, часткове відновлення, спрямоване на покращення окремих функцій екосистем, повне відновлення із повернення екосистеми до її початкового стану, реконструкцію – створення нової екосистеми на місці існуючої із значними пошкодженнями. Концепція передбачає врахування специфіки кожної ситуації, зокрема, місцевих умов, історії землекористування, соціально-економічних аспектів. У процесі відновлення об'єднуються екологічні, соціальні та економічні цілі, передбачений моніторинг і коригування стратегій. Концепція підкреслює, що відновлення є тривалим процесом і потребує комплексного підходу.

Завдяки концепції Restorative continuum можна обирати оптимальні рішення для реалізації заходів із відновлення природи залежно від ступеня деградації, доступних ресурсів і бажаних результатів, що забезпечує ефективне планування та адаптацію проектів до конкретних екологічних і соціальних умов.

Відновлювальний континуум охоплює низку заходів та втручань, спрямованих на поліпшення стану довкілля, протидію деградації екосистем і зменшення фрагментації ландшафтів[9]. Цей підхід підкреслює важливість взаємозв'язку між різними видами діяльності та наголошує, що характеристика території, де плануються відновлювальні роботи,

[9] Gann G. D., McDonald T., Walder B., Aronson J., Nelson C. R., Jonson J., Dixon K. W. International principles and standards for the practice of ecological restoration. *Restoration Ecology.* 2019. Vol. 27 (S1). P. 1–46. https://doi.org/10.1111/rec.13035

має вирішальне значення для ефективності цих заходів. Особливості місцевості визначають, які заходи підходять для окремих ландшафтних зон. У міру просування вправо по континууму (рис. 1) поліпшується не лише екологічний стан та біорізноманіття, але й загальна якість і обсяг екосистемних послуг.

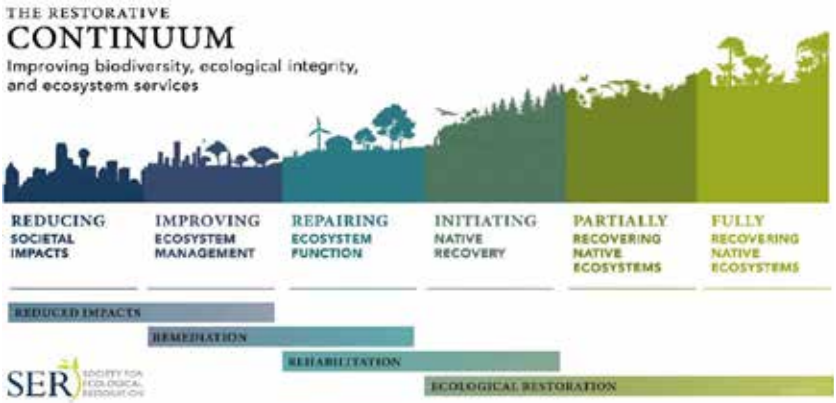


Рис. 1. Рівні впливу та заходи в межах концепції Restorative continuum за Gann G. D. із співавторами

У районах, що найбільше постраждали від антропогенного впливу, першим кроком є зменшення цього впливу. Далі йде етап ремедіації – усунення чи мінімізація шкоди навколишньому середовищу, яка виникла внаслідок людської діяльності. Після цього здійснюється реабілітація, спрямована на відновлення екосистемних функцій. Завершальним і найскладнішим етапом є повне екологічне відновлення – повернення екосистем до їх референтного стану, що передбачає «оздоровлення» системи.

Ганн Г. Д. із співавторами виділили 8 принципів екологічного відновлення:

1. Залучення зацікавлених сторін.
2. Використання результатів багатьох галузей науки.
3. Врахування інформації від природних еталонних (референтних) систем в умовах зміни довкілля.
4. Підтримки процесів відновлення екосистем.
5. Оцінка із використанням чітких цілей і завдань, використання вимірюваних індикаторів.
6. Прагнення до найвищого рівня можливого відновлення.

7. Кумулятивної цінності при використанні у значних масштабах.

8. Включеності до континууму відновлювальної діяльності, тобто конкретний метод або підхід до відновлення природи розглядається не ізольовано, а як частина ширшого спектру можливих дій від мінімального до максимального втручання.

Suding K. із співавторами виділили 4 принципи відновлення[10]:

1. Відновлення підвищує екологічну цілісність просторових систем. Відновлення деградованих територій прискорюється внаслідок визначення пріоритетності біоценозів, включаючи їх видовий склад, представництво всіх функціональних груп, особливості та процеси, необхідні для підтримки біоти та функцій екосистеми.

2. Відновлення стійке у довгостроковій перспективі, спрямоване на створення систем, які володітимуть властивостями самопідтримки, стійкості, відповідності ландшафту. Після завершення проекту відновлення людське втручання мінімізується. Якщо з часом таке втручання все ж потрібне, воно повинне бути спрямоване на імітацію природних процесів, яких ландшафт більше не забезпечує (наприклад, внаслідок пожеж чи видалення інвазійних видів), або на підтримку традиційних практик місцевих громад.

3. Реставрація з урахуванням минулого і майбутнього конкретної просторової системи. Знання особливостей функціонування екосистем в минулому дозволить визначити потенційні майбутні траєкторії відновлення. Часто історія розвитку конкретної системи є не шаблоном, а атрактором визначення цілей відновлення.

4. Відновлення приносить користь і залучає суспільство. Воно зосереджується на відновленні біорізноманіття та підтримці внутрішньої цінності природи.

Алгоритм відновлення екосистем (рис. 2) відображає цілісний та методологічно обґрунтований підхід до планування і реалізації заходів відновлення екосистем, ґрунтуючись на принципах адаптивного управління.

Логіка відновлення реалізується при поетапному переході від комплексної оцінки стану природної екосистеми до впровадження управлінських рішень із подальшим коригуванням дій на основі результатів моніторингу. Такий підхід відповідає сучасним уявленням про динамічний характер екосистем і необхідність гнучкого реагування на зміни природних та антропогенних умов.

[10] Suding K., Higgs E., Palmer M., Callicott J. B., Anderson C. B., Baker M., Schwartz K. Z. Committing to ecological restoration. *Science.* 2015. Vol. 348 (6235). P. 638–640.

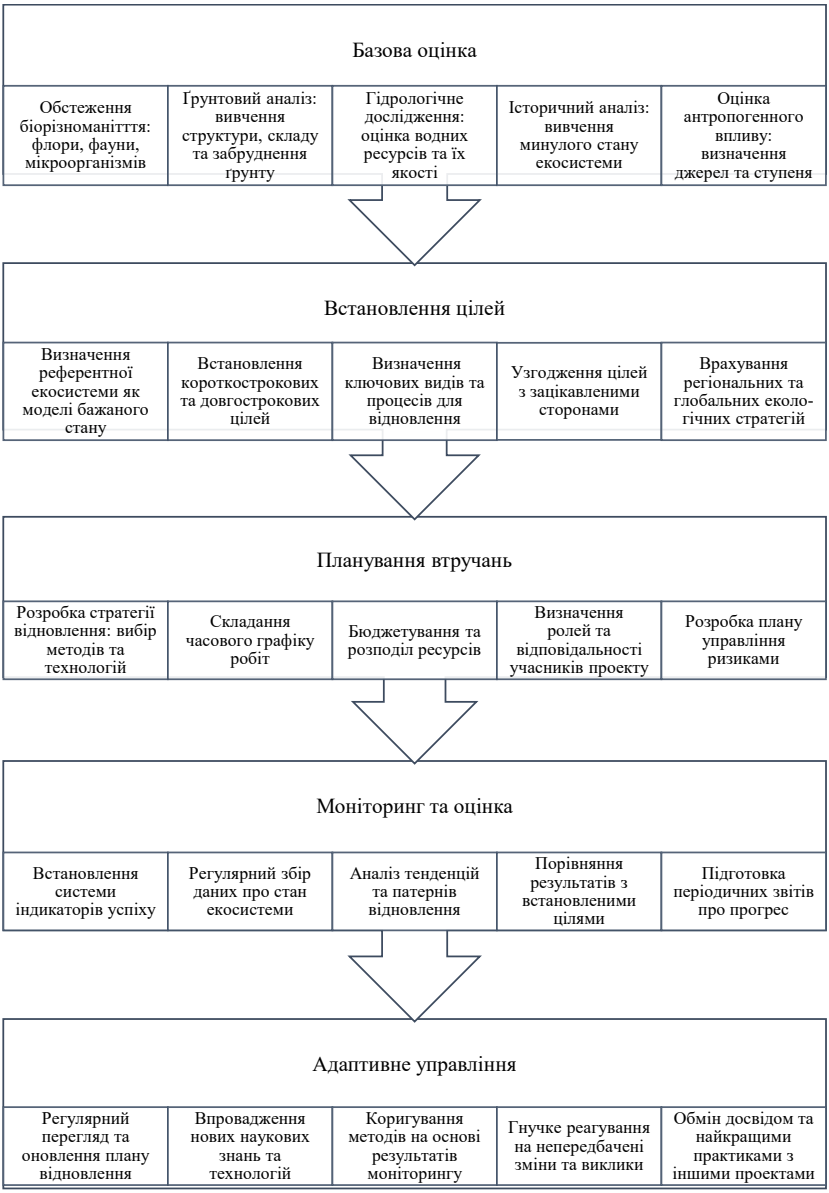


Рис. 2. Методологічні засади відновлення екосистем

Першим етапом алгоритму є базова оцінка, яка формує наукове підґрунтя для подальших рішень. Вона передбачає всебічне обстеження біорізноманіття, зокрема, стану флори, фауни та мікроорганізмів, аналіз ґрунтових умов із урахуванням їх структури, хімічного складу, рівня забруднення, а також гідрологічні, гідрохімічні та гідроекологічні дослідження. Важливим є історичний аналіз, який дає змогу відтворити попередній стан екосистеми та визначити характер і масштаби змін, що відбулися.

На основі результатів базової оцінки встановлюються цілі відновлення. Ключовим завданням етапу є формування уявлення про референтний стан екосистеми, який може бути досягнутий у конкретних природних і соціально-економічних умовах. У межах цього етапу також визначаються короткострокові та довгострокові цілі, ідентифікуються ключові види та екологічні процеси, відновлення яких є критично важливим для стабілізації функціонування екосистеми. Важливе значення має узгодження цілей із стейкхолдерами, а також їх відповідність регіональним, національним і глобальним екологічним стратегіям і зобов'язанням.

На етапі планування втручань розробляється стратегія відновлення, вибираються методи і технології, які відповідають природним умовам території та визначеним цілям. Складається детальний графік робіт, розробляється план управління ризиками. Такий підхід забезпечує мінімізацію невизначеності та підвищення ефективності заходів відновлення.

Реалізація запланованих втручань супроводжується систематичним моніторингом та оцінкою результатів. На цьому етапі розробляється система індикаторів динаміки стану екосистем, проводиться збір і аналіз даних, виявляються тенденції та закономірності зміни стану. Отримані результати порівнюються з установленими цілями для оцінки рівня їх досягнення.

Завершальним етапом алгоритму є адаптивне управління, яке забезпечує гнучкість у прийнятті рішень. На цьому етапі проводиться регулярний перегляд і оновлення планів відновлення з урахуванням результатів моніторингу, коригування методів у разі виявлення відхилень від запланованих показників, оперативне реагування на непередбачені виклики.

3. Окремі проблеми реалізації заходів відновлення природи в Україні

Відновлення природних екосистем у Європі займає ключову роль у екологічному порядку денному. 21 червня 2024 р. схвалено амбітний план відновлення довкілля до 2050 р. в ЄС [11]. Документ містить чіткі вимоги до відновлення різних типів екосистем. Кожна країна-член зобов'язана розробити національний план відновлення природи. Наприклад, у сфері сільського господарства необхідно покращити такі показники, як популяція польових метеликів, рівень органічного вуглецю в ґрунтах та біорізноманіття ландшафтів. У лісовому господарстві передбачено збільшення популяції птахів, обсягів мертвої деревини, видового розмаїття та площ сполучених лісів, висадження 3 млрд. дерев. На річках передбачено демонтувати 25 тис. км штучних бар'єрів до 2030 р. Країни ЄС мають відновити 30 % територій до 2030 р., 60 % до 2040 р. та 90 % до 2050 р. На першій стадії буде приділено особливу увагу мережі Natura 2000.

Ситуація в Україні виглядає менш оптимістично. Виконання природоохоронних заходів у межах Угоди про асоціацію з ЄС поки не демонструє значного поступу. Основною причиною цього є низький пріоритет екологічних питань у порядку денному КМУ та ВРУ.

Наша країна зіткнулася зі значними екологічними викликами та має комплексний характер природоохоронних проблем. Екологічна складова вимог ЄС лише раз фігурувала в структурі умов Асоціації[12] – ще на етапі виконання Порядку денного з Асоціації (підготовка Стратегії екологічної політики у так званій Матриці Фюле). Відтоді питання захисту навколишнього середовища не були включені в пакети вимог. Частково це пов'язано із війною. ЄС наразі не акцентує увагу на екологічних питаннях при обговоренні питань асоціації. Проте з часом ситуація зміниться і екологічні питання прийдеться вирішувати.

Цей підхід прослідковується й у стратегічному плануванні на національному рівні. Наприклад, у проекті Середньострокового плану дій уряду до 2020 р. тематиці довкілля не було відведено окремої цілі. У Плані пріоритетних дій уряду на 2023 р. питання захисту довкілля згадувалися лише в контексті економічної ефективності індустріальних

[11] Regulation (EU) 2024/1991 of the European Parliament and of the Council of 24 June 2024 on nature restoration and amending Regulation (EU) 2022/869. URL: https://eur-lex.europa.eu/eli/reg/2024/1991/oj/eng

[12] Охорона довкілля в угоді про асоціацію між Україною та ЄС. Доповідь Платформи громадянського суспільства Україна-ЄС. Брюссель, 18 травня 2017 року. URL: https://www.civic-synergy.org.ua/wp- content/uploads/2018/04/Dovkillia-Fin-6.pdf

парків, регулювання використання біоцидних продуктів, поводження з радіоактивними відходами та адміністрування прав на об'єкти рослинного й тваринного світу. Проблеми біорізноманіття чи відновлення природи залишилися поза увагою. Проте розробка й удосконалення національних документів для імплементації Угоди про асоціацію мають відіграти ключову роль для створення інституційних і організаційних механізмів її виконання. З-поміж таких документів варто згадати Угоду про асоціацію України та ЄС. Глава 6 Угоди «Навколишнє природне середовище» визначає ключові напрями співпраці для реформування системи екологічного врядування (ст. 360-363, 365, 366). З 1.11. 2014 р. розпочалось тимчасове застосування деяких розділів і статей Угоди.

Впровадження положень Глави 6 в Україні наразі, здебільшого, спрямоване на адаптацію національного законодавства до законодавства ЄС у сфері охорони довкілля згідно Додатка XXX до Угоди [13]. Він містить перелік 29 директив та регламентів, які охоплюють 8 основних галузей. Окрім того, Угода передбачає графік імплементації кожного акту ЄС, зобов'язуючи дотримуватись визначених строків. Питань відновлення природи особливо стосується розділ 5 – «Охорона природи», який вимагає забезпечення впровадження Директиви № 2009/147/ЄС про захист диких птахів та Директиви № 92/43/ЄС про збереження природного середовища, флори та фауни, з урахуванням змін, внесених іншими європейськими документами.

Україна вже проводить окремі заходи з відновлення природи на законодавчому рівні. У червні 2022 р. прийнято закон про охорону лісів, а в грудні того ж року Кабінет Міністрів України затвердив зміни до правил відтворення лісів, які забороняють використання інвазійних чужорідних видів. У травні 2023 р. також прийнято перелік таких видів дерев. Крім того, в липні 2022 р. затверджено план заходів із реалізації стратегії біобезпеки та біозахисту на період 2022–25 рр., що охоплює питання інвазійних видів. Із травня 2022 р. Україна приєдналася до Нагойського протоколу про доступ до генетичних ресурсів. Документ SWD (2023) визначає подальші кроки для захисту біорізноманіття, зокрема, таких напрямів, як охорона диких птахів та оселищ, управління зоопарками й пастками, а також розробка стратегії захисту біорізноманіття та її план дій. Особливу увагу приділено імплементації Куньмінсько-Монреальської глобальної рамкової угоди з біорізноманіття. Важливим

[13] Додаток XXX до глави 6 «Навколишнє природне середовище» Розділу V «Економічне і галузеве співробітництво». URL: https://www.kmu.gov.ua/storage/app/sites/1/ugoda-pro-asociaciyu/30_Annex.pdf

завданням є створення й управління об'єктами Natura 2000 та фактична реалізація уже прийнятих нормативних актів.

Законодавство України наразі частково узгоджене із Регламентами ЄС про деревину та про управління правозастосуванням лісового законодавства та торгівлю деревиною, однак необхідний контроль дотримання їх норм.

Для цього необхідно посилити незалежність органів моніторингу та контролю за ліцензуванням, вирубкою й продажем лісової продукції.

У червні 2023 р. Верховна Рада України ратифікувала Нагоя-Куала-Лумпурський додатковий протокол до Картахенського протоколу про біобезпеку.

У сфері охорони природи в Україні прийнято ряд нормативно-правових актів, однак їх практичного впровадження для виконання природоохоронних директив ЄС поки що недостатньо. Зокрема, не забезпечено включення 271 природоохоронного об'єкта України до Смарагдової мережі Європи, як того вимагає Бернська конвенція. План реалізації Директиви про захист диких птахів не передбачає заходів, необхідних для створення та функціонування спеціальних природоохоронних територій, що прямо суперечить вимогам статті 4.2 цієї директиви. Імплементація цих норм є обов'язковою також у рамках Енергетичного Співтовариства. У 2021 р. робоча група Мінприроди підготувала проект концепції та законопроект «Про збереження природних оселищ та видів природної фауни і флори». Документ є прогресивним і заслуговує на увагу, однак його так і не було ухвалено Верховною Радою.

Процес імплементації європейських екологічних вимог триває. Зокрема, Концепція реформи Державної екологічної інспекції передбачає підвищення ефективності природоохоронного контролю у процесі децентралізації. Це передбачається реалізувати шляхом передачі низки функцій місцевим громадам (контроль за об'єктами природно-заповідного фонду місцевого значення, станом земель, боротьба з браконьєрством, належне поводження з відходами). Також планується утворити інститут громадських інспекторів охорони довкілля на основі територіальних громад.

Важливим аспектом імплементації залишається інформування про стан європейської інтеграції на регіональному рівні. Низький рівень обізнаності місцевої влади щодо впровадження екологічної складової Угоди про асоціацію негативно позначається на темпах розширення площ природно-заповідного фонду та розвитку екологічної мережі. Нині зусилля з імплементації екологічної частини Угоди зосереджені на

адаптації національного законодавства до відповідних норм і стандартів ЄС. Водночас місцеві органи влади майже не залучені до формування політики й розробки законодавчих актів, що ускладнить практичну реалізацію прийнятих документів у майбутньому.

ВИСНОВКИ

Сучасна політика України у сфері охорони та відновлення природних екосистем формується під впливом міжнародних зобов'язань, наприклад, європейської стратегії збереження біорізноманіття, та задекларована у ключових національних стратегічних документах. Зокрема, для громадського обговорення оприлюднено проєкт Стратегії збереження біологічного різноманіття України до 2035 р. Збільшення площі природно-заповідного фонду, розвиток національної екологічної мережі та підвищення лісистості території країни відповідає загальноєвропейським підходам, але стримується низкою об'єктивних і суб'єктивних чинників.

Домінування традиційної природоохоронної моделі, орієнтованої переважно на заповідання територій, нині не достатньо для належного реагування на масштаби деградації екосистем. Зростає потреба у переході від виключно охоронних заходів до комплексного екологічного відновлення, спрямованого на відтворення структури, функціонування та екосистемних послуг природних комплексів, зокрема, на територіях із високим рівнем антропогенної трансформації та деградації природи.

Ефективне відновлення екосистем потребує впровадження адаптивного управління, заснованого на поетапній базовій оцінці стану довкілля, чіткому формулюванні реалістичних цілей, плануванні втручань, систематичному моніторингу та коригуванні управлінських рішень. Запропонований у роботі алгоритм відновлення екосистем відображає логічну послідовність цих етапів і може бути використаний як методологічна основа для розробки науково обґрунтованих програм відновлення екосистем різних масштабів.

Воєнні дії суттєво ускладнили виконання Україною міжнародних природоохоронних зобов'язань, спричинили значні втрати біорізноманіття, деградацію заповідних територій і зростання екологічних ризиків. Водночас післявоєнне відновлення створює унікальне «вікно можливостей» для інтеграції екологічного відновлення в загальнодержавні програми відбудови, що дозволяє поєднати природоохоронні та соціально-економічні цілі.

Пріоритетними регіонами для розширення ПЗФ та проведення заходів відновлення є території з відносно збереженими чи слабо

трансформованими ландшафтами, зокрема Карпати та Полісся, які виконують ключові біосферні функції та мають високий потенціал для збереження біорізноманіття. Значна частина деградованих територій потребує ренатуралізації для їх подальшої охорони або включення до екомережі.

Загалом результати дослідження свідчать, що досягнення стратегічних екологічних цілей України можливе лише за умови розширення природно-заповідного фонду, системного відновлення екосистем, посилення інституційної спроможності органів управління та залучення усіх зацікавлених сторін. Тому необхідні подальші наукові дослідження у цій царині, розробки прикладних методик оцінки деградації екосистем і ефективності їх відновлення в умовах сучасних екологічних і безпекових викликів.

АНОТАЦІЯ

Проаналізовано сучасні підходи до охорони та відновлення природних екосистем України в контексті міжнародних зобов'язань і європейської інтеграції. Розглянуто стратегічні цілі державної екологічної політики щодо розвитку природно-заповідного фонду, національної екологічної мережі та підвищення лісистості території країни, оцінено реалістичність їх досягнення в умовах високого рівня антропогенної трансформації довкілля та воєнних дій. Продемонстровано обмеженість традиційної природоохоронної моделі, орієнтованої переважно на заповідання територій. Обґрунтовано необхідність переходу до комплексного екологічного відновлення як ключового інструменту збереження біорізноманіття та підвищення екологічної стійкості ландшафтів. Запропоновано алгоритм відновлення екосистем, побудований на принципах адаптивного управління. Він включає етапи базової оцінки, встановлення цілей, планування втручань, моніторингу та коригування управлінських рішень. Окреслено основні виклики реалізації відновлювальних заходів в Україні. Зокрема, наслідки військових дій, інституційні обмеження та соціально-економічні чинники. Визначено пріоритетні напрями подальших досліджень і практичних дій у сфері екологічного відновлення.

Література

1. Закон України № 2697-VIII від 28.02.2019 «Про Основні засади (стратегію) державної екологічної політики України на період до 2030 року». URL: https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/2697-19/card5

2. Угода про асоціацію між Україною, з однієї сторони, та Європейським Союзом, Європейським співтовариством з атомної енергії і їхніми державами-членами, з іншої сторони. URL: https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/984_011#Text

3. Communication from the Commission to the European parliament, the Council, the European economic and social committee and the Committee of the regions EU. Biodiversity Strategy for 2030. URL: https://eur-lex.europa.eu/resource.html?uri=cellar:a3c806a6-9ab3-11ea-9d2d-01aa75ed71a1.0001.02/DOC_1&format=PDF

4. EU Biodiversity Strategy Actions Tracker. URL: https://dopa.jrc.ec.europa.eu/kcbd/actions-tracker/#COHERENT%20NETWORK%20OF%20PROTECTED%20AREAS

5. Російсько-українська війна: вплив на довкілля. URL: https://www.topleadprojects.com/environmental-project-main

6. Strategic Plan for Biodiversity 2011-2020. URL: https://www.cbd.int/decision/cop?id=12268

7. Gann G. D., McDonald T., Walder B., Aronson J., Nelson C. R., Jonson J., Dixon, K. W. International principles and standards for the practice of ecological restoration. *Restoration Ecology*. 2019. Vol. 27(S1). P. 1–46. https://doi.org/10.1111/rec.13035

8. Suding K., Higgs E., Palmer M., Callicott J. B., Anderson C. B., Baker M., Schwartz K. Z. Committing to ecological restoration. *Science*, 2015. Vol. 348 (6235). P. 638–640. URL: https://10.1126/science.aaa4216

9. Regulation (EU) 2024/1991 of the European Parliament and of the Council of 24 June 2024 on nature restoration and amending Regulation (EU) 2022/869. URL: https://eur-lex.europa.eu/eli/reg/2024/1991/oj/eng

10. Охорона довкілля в угоді про асоціацію між Україною та ЄС. Доповідь Платформи громадянського суспільства Україна-ЄС. Брюссель, 18 травня 2017 року. URL: https://www.civic-synergy.org.ua/wp-content/uploads/2018/04/Dovkillia-Fin-6.pdf

11. Додаток XXX до глави 6 «Навколишнє природне середовище» Розділу V «Економічне і галузеве співробітництво». URL: https://www.kmu.gov.ua/storage/app/sites/1/ugoda-pro-asociaciyu/30Annex.pdf

Information about the authors:
Fesyuk Vasyl Oleksandrovych,
Doctor of Geographical Sciences,
Professor at the Department of Physical Geography,
Lesya Ukrainka Volyn National University
13, Voli avenue, Lutsk, 43025, Ukraine

Moroz Iryna Anatoliivna,
Candidate of Chemical Sciences,
Associate Professor at the Department
of Food Technology and Chemistry,
Lutsk National Technical University
75, Lvivska street, Lutsk, 43000, Ukraine

Polianskyi Serhii Volodymyrovych,
Candidate of Geographical Sciences,
Associate Professor at the Department of Physical Geography,
Lesya Ukrainka Volyn National University
13, Voli avenue, Lutsk, 43025, Ukraine

03
SECTION

BIOLOGICAL RESEARCH

CHAPTER 13

КОМПЛЕКСНІ ПІДХОДИ ДО ПРОФІЛАКТИКИ ОКСИДАЦІЙНОГО СТРЕСУ ТА ІМУНОДЕФІЦИТНИХ СТАНІВ У ТВАРИН ЗА ТЕХНОГЕННОГО НАВАНТАЖЕННЯ

Вус У. М., Гутий Б. В.
DOI https://doi.org/10.30525/978-9934-26-654-6-13

ВСТУП

У сучасній ветеринарній науці та практиці особливу увагу приділяють пошуку ефективних засобів, здатних підвищувати неспецифічну резистентність та адаптаційний потенціал тварин в умовах дії стресових і токсичних факторів середовища. Тривала експозиція важких металів, мікотоксинів, пестицидів або інших ксенобіотиків спричиняє глибокі порушення у функціонуванні антиоксидантної та імунної систем, що проявляється розвитком оксидаційного стресу, імунодефіцитних станів і метаболічних дисфункцій[1]. У даному контексті перспективним напрямом вважається комплексне застосування антиоксидантів, вітамінів і метаболічних коректорів, які здатні не лише нейтралізувати вільнорадикальні процеси, але й відновлювати структурно-функціональну цілісність клітинних мембран, активність ензимних систем і гормональну рівновагу.

До найбільш ефективних засобів належать вітаміни антиоксидантної дії (Е, С, А, групи В), а також вітаміноподібна речовина L-карнітин і есенціальна амінокислота метіонін, які беруть участь у регуляції енергетичного метаболізму, біосинтезі білка та активації імунокомпетентних клітин. Важливе значення мають також мікроелементи селен і цинк, що входять до складу ключових антиоксидантних ферментів – глутатіонпероксидази та супероксиддисмутази. Вони забезпечують захист клітин від пероксидного окиснення ліпідів, підтримують стабільність імунної відповіді, а також потенціюють дію вітамінів і амінокислот, створюючи синергічний ефект у системі антиоксидантного гомеостазу. Їх поєднане використання у схемах

[1] Мартишук Т. В., Гутий Б. В. Імунофізіологічний стан та антиоксидантний потенціал організму поросят за умов оксидаційного стресу та дії коригуючих чинників : монографія. Львів : СПОЛОМ, 2021. 108 с.

профілактики та лікування дозволяє зміцнити природні захисні системи організму, підвищити стійкість до дії токсикантів, стимулювати імунну відповідь і підтримати продуктивність тварин на високому рівні.

1. Використання L-карнітину як метаболічного коректора у тваринництві

Серед сучасних засобів підвищення адаптаційної здатності та стійкості організму тварин значне місце посідають метаболічні коректори вітаміноподібної природи, зокрема L-карнітин[2]. Його біологічна дія пов'язана з ключовою роллю у транспорті довголанцюгових жирних кислот через внутрішню мембрану мітохондрій, що забезпечує оптимізацію енергетичного обміну, зменшення ліпідного навантаження на печінку та підвищення ефективності окисних процесів. Він сприяє збереженню клітинної енергетики в умовах стресу, стабілізує структуру мітохондрій, нормалізує співвідношення $НАД^+$/НАДН, а також зменшує інтенсивність вільнорадикальних процесів, виконуючи антиоксидантну функцію. Застосування L-карнітин тваринам сприяє підвищенню опірності організму до гіпоксії та інтоксикацій, що особливо важливо при утриманні тварин у техногенно навантажених регіонах або при дії токсичних елементів[3].

У дослідженнях Єфімова В. Г. та ін. (2011) доведено, що введення L-карнітину у складі кормової добавки «Карнікінг» (50 % L-карнітину) у дозі 500 г/т комбікорму позитивно впливає на морфологічні показники крові поросят у період відлучення. Встановлено, що у тварин дослідної групи рівень гемоглобіну зростав на 42,6 % ($p < 0,05$), а гематокриту – на 21,5 % ($p < 0,001$) порівняно з контролем. Одночасно спостерігалося збільшення кількості еритроцитів і лімфоцитів, що вказує про активацію еритропоезу та клітинного імунітету. Позитивна дія L-карнітину пояснюється його участю в підтриманні енергетичного гомеостазу, мембранопротекторних та детоксикаційних процесах. Він попереджає розвиток гіпохромної анемії, знижує рівень стрес-індукованого катаболізму, нормалізує лейкоцитарну формулу та сприяє швидшій адаптації тварин до технологічних навантажень[4].

---

[2] Li J., Liu L., Weng J., Yin T. L., Yang J., Feng H. L. Biological roles of l-carnitine in oocyte and early embryo development. *Molecular reproduction and development.* 2021. Vol. 88, No. 10. P. 673–685.

[3] Karam K. M., Alebady A. S., Al-Nailey K. G. C., Al-Delemi D. H. J. L-Carnitine effect on induced hyperlipidemia on premature rats: fertility profile. *Journal of medicine and life.* 2022. Vol. 15, No. 1. P. 124–131.

[4] Єфімов В. Г., Костюшкевич К. Л., Дідик К. О., Алексєєва Н. В. Вплив L-карнітину наморфологічні показники крові поросяту період відлучення. *Вісник Дніпропетровського державного аграрного університету*. 2011. № 2. URL: http://nbuv.gov.ua/UJRN/vddau_2011_2_28

Криницька І. Я. та співавт. (2010) на основі проведених досліджень встановила, що введення карнітину хлориду тваринам із гострим алкогольним отруєнням на тлі інтоксикації кадмію хлоридом та ацетатом свинцю сприяє зниженню інтенсивності лізису білкових структур – як низько-, так і високомолекулярних білків та колагену – й одночасно підвищує інгібіторний потенціал плазми крові. Зростання рівня інгібіторів у крові під впливом карнітину хлориду може бути пов'язане з його здатністю активізувати метаболічні процеси, зокрема анаболічну ланку гомеостазу, що забезпечує синтез білкових структур. Крім того, враховуючи, що окиснені білки є більш чутливими до протеолітичного розщеплення, а етанол і солі важких металів проявляють виражену прооксидантну дію, можна зробити висновок, що карнітину хлорид має антиоксидантні властивості, завдяки яким запобігає окисненню активних центрів білкових інгібіторів та стабілізує білковий обмін у організмі[5].

L-карнітин справляє виражений позитивний вплив на показники ендогенної інтоксикації за умов токсичного ураження парацетамолом у поєднанні з харчовою депривацією. Це проявляється зниженням рівня ланцюгових і ароматичних амінокислот у складі пептидних фракцій молекул середньої маси, а також послабленням їх загального токсичного впливу на мембрани еритроцитів. Найбільш виражений коригувальний ефект препарату спостерігається на сьому добу експерименту, що вказує про його здатність стабілізувати обмінні процеси та зменшувати прояви ендотоксикозу[6].

Карнітин проявляє виражену антиоксидантну активність, оскільки стимулює каталазу – один із ключових ензимів системи антиоксидантного захисту організму. Дану властивість необхідно враховувати при визначенні оптимальних доз препаратів на основі карнітину, особливо під час їх застосування у практиці ветеринарної медицини. Також варто зазначити, що карнітин виконує функції антигіпоксанта та імуномодулятора, пригнічує агрегацію тромбоцитів і виявляє фібринолітичну активність, що сприяє покращенню мікроциркуляції, підвищенню швидкості кровотоку та, відповідно, ефективнішому транспорту кисню до м'язів. Додатково встановлено, що L-карнітин може діяти як антагоніст

[5] Криницька І. Я., Марущак М. І., Лазарчук О. В., Мудра А. Є., Яворська С. І., Габор Г. Г. Вплив карнітину хлориду на показники протеїназо-інгібіторної системи у щурів за умови гострого алкогольного отруєння на тлі інтоксикації солями кадмію та свинцю. *Здобутки клінічної і експериментальної медицини.* 2010. № 1. С. 79–82.

[6] Гембаровський М. В. (2013). Вплив L-карнітину на показники ендогенної інтоксикації за умови експериментального токсичного ураження парацетамолом на тлі харчової депривації. *Медична хімія*. 2013. Т. 15, № 2. С. 68–71.

простагландину H_2, беручи участь у регуляції судинного тонусу та забезпечуючи вплив на киснево-транспортну функцію крові[7].

Цехмістренко С. І. та Коберська В. А. (2012) довели, що додавання L-карнітину до розріджувача сперми бугаїв сприяє активації ензимів антиоксидантного захисту – каталази та глутатіонпероксидази – і підвищує виживання спермiїв. Оптимальна концентрація препарату (30 мг/100 мл) забезпечує нормалізацію клітинного метаболізму за умов оксидаційного стресу, стабілізує мембрани, підвищує енергетичний потенціал клітин і проявляє виражену антиоксидантну дію. Це підтверджує ефективність використання L-карнітину як метаболічного і антиоксидантного засобу для підвищення відтворювальної здатності тварин[8].

Коберська В. А. (2015) встановила, що згодовування L-карнітину у складі раціону бугаїв у дозах 20–40 г/добу сприяє підвищенню вмісту фосфоліпідів у спермі, зниженню рівня холестеролу та неестерифікованих жирних кислот, стабілізації мембран і зменшенню інтенсивності пероксидного окиснення ліпідів. Це супроводжується підвищенням активності, концентрації та виживання спермiїв. Механізм дії L-карнітину пов'язаний із активацією анаболічних процесів, мобілізацією ліпідів як енергетичного субстрату та оптимізацією фосфоліпідного складу мембран, що забезпечує підвищення фертильності та резистентності тварин[9].

За даними Загайко А. Л. та співавт. (2016), L-карнітин є ключовою вітаміноподібною речовиною, що регулює енергетичний обмін, β-окиснення жирних кислот і детоксикацію ксенобіотиків. Він виконує анаболічну, антиоксидантну, антиапоптотичну та нейропротекторну функції, стабілізуючи клітинні мембрани і підвищуючи активність ферментів антиоксидантного захисту. Доведено ефективність застосування L-карнітину при патологіях печінки, серця, нервової системи та ендокринних розладах, що вказує про його значний потенціал у ветеринарній практиці як метаболічного коректора й імуномодулюючого засобу[10].

---

[7] Gu S., Wang W., Ye G., Chen C., Zhou Y., Guo L., Zhong S., Li X., Fu X., Wen C., Tang L., Sun J., Hou J., Li Y. Hepatocyte-Derived L-Carnitine Restricts Hepatitis B Surface Antigen Loss Through an Immunosuppressive Effect on Germinal Center-Related Immune Cells. *The Journal of Infectious Diseases*. 2022. Vol. 225, No. 11. P. 1955–1966.

[8] Цехмістренко С. І., Коберська В. А. Активність ферментів антиоксидантного захисту в еякулятах бугаїв за додавання L-карнітину до розріджувача сперми. *Технологія виробництва і переробки продукції тваринництва.* 2012. № 8. С. 116–119.

[9] Коберська В. А. Вплив L-карнітину у складі раціону бугаїв на ліпідний склад та якість сперми. *Біологія тварин*. 2015. Т. 17, № 1. С. 62–67.

[10] Загайко А. Л., Брюханова Т. О., Шинкарьов А. А., Мельник Н. В. Метаболічні ефекти карнітину, роль у розвитку патологій та перспективи клінічного застосування (огляд). *Український біофармацевтичний журнал*. 2016. № 6. С. 17–22.

Присяжнюк В. П. (2017) довів високу ефективність включення L-карнітину до комплексного лікування хворих із неалкогольною жировою хворобою печінки. Введення препарату забезпечувало зниження активності трансаміназ, γ-глутамілтранспептидази, лактатдегідрогенази, нормалізацію вуглеводного обміну та зменшення інтенсивності запалення. Виявлено суттєве зниження рівнів TNF-α і лептину при одночасному підвищенні адипонектину, що вказує про відновлення цитокінового та адипокінового балансу. Таким чином, L-карнітин проявляє виражену гепатопротекторну, антиоксидантну та антизапальну дію, а також може розглядатись як перспективний метаболічний коректор у ветеринарній практиці для підвищення резистентності організму тварин до токсичних уражень печінки[11].

Карнітин є біологічно активною добавкою, яка знижує рівень холестеролу та тригліцеридів, сприяє нормалізації ліпідного обміну в печінці та попереджає розвиток атеросклеротичних змін. Його застосування оптимізує метаболічні процеси, покращує функціональний стан печінки, що має особливе значення для організмів із підвищеним токсичним навантаженням або наслідками зловживання алкоголем. Карнітин також сприяє виведенню з цитоплазми клітин проміжних метаболітів і токсичних сполук, запобігаючи їх накопиченню в організмі. До основних фармакологічних ефектів карнітину хлориду належать стимуляція імунної системи та активація процесів детоксикації, що забезпечує очищення організму від шкідливих речовин і підтримує метаболічну рівновагу[12].

П'ятничко О. М. та співавт. (2021) довели, що комбінований препарат на основі бутафосфану, вітамінів групи В і L-карнітину проявляє виражену метаболічну, гепато- та нефропротекторну дію у коней, які зазнають надмірного навантаження або інтоксикації. Препарат стимулює еритропоез, білковий і енергетичний обмін, нормалізує активність ензимів (АсАТ, АлАТ, ЛДГ), знижує прояви інтоксикації та сприяє відновленню гомеостазу. Таким чином, поєднання бутафосфану, вітамінів B_{12}, B_3 і L-карнітину забезпечує антистресовий, тонізуючий і антиоксидантний ефекти, що дозволяє використовувати

[11] Присяжнюк В. П. Ефективність застосування L-карнітину у комплексному лікуванні хворих на неалкогольну жирову хворобу печінки. *Гепатологія*. 2017. № 1. С. 40–48.

[12] Демків І. Я. Вплив карнітину хлориду на показники імунітету та стан антиоксидантної системи у тварин із гострим отруєнням етиловим спиртом на фоні тривалої інтоксикації солями свинцю і кадмію. *Науковий вісник Ужгородського університету. Серія: Медицина.* 2008. Вип. 33. С. 44–49.

подібні комплекси для підвищення резистентності та функціональної стабільності організму тварин[13].

Лучин І. С. та ін. (2024) встановили, що додавання препарату L-карнітину "CarnEon 50" у дозах 200–250 г/т комбікорму в годівлі молодняку кролів сприяє підвищенню середньодобових приростів на 4,2–10,5 %, поліпшенню засвоєння корму на 2,5–3,9 % і збільшенню маси парної тушки на 124 г. Препарат забезпечував антиоксидантну, антистресову та метаболічну дію, запобігав розвитку гастроентероколітів і втрат поголів'я. Оптимальною дозою визначено 200–250 г/т комбікорму, що підвищує рентабельність виробництва кролятини до 34 %. Таким чином, L-карнітин можна розглядати як безпечний природний біостимулятор, який покращує енергетичний обмін, адаптаційні можливості та продуктивність тварин[14].

Таким чином, L-карнітин є ефективним засобом підвищення природної резистентності тварин, який проявляє антистресову, антиоксидантну, імуномодулюючу та гемопоетичну дію. Його включення до складу кормових добавок або комплексних препаратів разом із вітамінами, селеном і цинком сприяє зміцненню захисних систем організму та забезпечує вищий рівень продуктивності і збереженості молодняку.

2. Роль вітамінів Е і B_{12} у підтриманні метаболічної рівноваги та імунного статусу тварин

Вітаміни є незамінними біорегуляторами, які відіграють важливу роль у підтриманні гомеостазу, метаболічної стабільності та адаптаційних можливостей організму тварин. Вони приймають участь у регуляції окисно-відновних реакцій, синтезі ензимів, гормонів, нуклеїнових кислот, а також у функціонуванні системи антиоксидантного захисту. Дефіцит або дисбаланс вітамінів призводить до порушень білкового, ліпідного та вуглеводного обміну, зниження неспецифічної резистентності, розвитку

[13] П'ятничко О. М., Жила М. І., Шкодяк Н. В., Салій О. О., Деркач М. В., Калиновська Л. В. Ефективність застосування препарату на основі бутафосфану, вітамінів групи В та L-карнітину при лікуванні коней. *Науковий вісник Львівського національного університету ветеринарної медицини та біотехнологій імені С. З. Гжицького. Серія: Ветеринарні науки*. 2021. Т. 23, № 101. С. 31–37.

[14] Лучин І. С., Сотніченко Ю. М., Невесенко А. В., Білан А. П. Безпечність і продуктивна дія препарату L-карнітину на інтенсивність росту молодняку кролів. *Ефективне кролівництво і звірівництво*. 2024. № 10. С. 100–112.

гіповітамінозів, імунодепресивних станів та патологій печінки, травного каналу, серцево-судинної та нервової систем[15].

Особливе значення вітамінів у ветеринарній практиці зумовлене їх комплексною фізіолого-біохімічною дією. Вітамін А забезпечує нормальний ріст і регенерацію епітелію, приймає участь у синтезі глікопротеїнів; вітамін Е виступає потужним антиоксидантом, що запобігає пероксидному окисненню ліпідів і стабілізує клітинні мембрани; вітамін С підвищує антиоксидантний потенціал і фагоцитарну активність лейкоцитів; вітаміни групи В – каталізують ферментативні реакції вуглеводного, жирового та білкового обміну, сприяють функціонуванню нервової системи[16].

Вітамін B_{12} (ціанокобаламін) є одним із найважливіших водорозчинних вітамінів, який приймає участь у регуляції клітинного метаболізму, синтезі нуклеїнових кислот, еритропоезі та функціонуванні нервової системи. Його молекула містить центральний атом кобальту, завдяки чому вітамін відноситься до кобаламінів – коферментів, що забезпечують реалізацію реакцій переносу метильних груп і перетворення жирних кислот[17].

У ветеринарній практиці вітамін B_{12} застосовується для профілактики анемій, стимуляції росту, покращення апетиту, поліпшення функції печінки, нервової та серцево-судинної систем, а також у комплексній терапії токсичних уражень, гіповітамінозів та інтоксикацій[18]. Препарати на основі ціанокобаламіну та метилкобаламіну, зокрема B_{12} Анкерман, продемонстрували високу ефективність і безпечність при усуненні дефіцитних станів, відновленні метаболічного балансу та профілактиці нейродегенеративних процесів.

Вітамін B_{12} тісно взаємодіє з фолієвою кислотою та метіоніном, утворюючи єдину метаболічну систему, яка регулює реметилювання

---

[15] Lavryshyn Y., Gutyj B., Zhyla M., Kurylas L., Prysiazhniuk V., Khariv I., Voroniak V. Influence of “Metisevit” feed additive and liposomal preparation “Lipointersil” on the level of vitamins in the blood of bulls at experimental chronic cadmium toxicosis. *Scientific Messenger of LNU of Veterinary Medicine and Biotechnologies. Series: Veterinary Sciences*. 2020. Vol. 22, No. 100. P. 88–93.

[16] Гутий Б. В. Вміст вітамінів А і Е у крові бичків за умов кадмієвої інтоксикації. *Вісник Сумського національного аграрного університету. Серія: Ветеринарна медицина*. 2013. № 2. С. 31–33.

[17] Al Amin A. S. M., Gupta V. Vitamin B12 (Cobalamin) // *StatPearls*. Treasure Island (FL) : StatPearls Publishing, 2023

[18] Golovach P., Gutyj B., Kolomiiets I., Ostapiv D., Oseredchuk R., Sloboda O. The effect of B groups vitamins (B1, B2, B5, B6, B10, B12) on the activity of antioxidant protection system enzymes and the content of lipid peroxide oxidation products in the blood of feeding cattle. *Scientific Messenger of LNU of Veterinary Medicine and Biotechnologies. Series: Veterinary Sciences*. 2023. Vol. 25, No. 112. P. 22–26.

гомоцистеїну, синтез нуклеїнових кислот і метилювання біомолекул. Його дефіцит призводить до накопичення гомоцистеїну – сполуки з вираженою токсичною дією, що викликає оксидативний стрес, ендотеліальну дисфункцію, судинні порушення і прискорене старіння клітин. Це має безпосереднє значення для ветеринарної практики, оскільки подібні метаболічні розлади у тварин знижують продуктивність, фертильність і резистентність до захворювань[19].

Вітамін B_{12} має важливе антиоксидантне та нейропротекторне значення, оскільки приймає участь у відновленні мієлінових оболонок нервових волокон, знижує оксидаційний стрес, попереджує ушкодження мембран нейронів. В експериментальних і клінічних дослідженнях доведено, що введення вітаміну B_{12} сприяє регенерації нервової тканини, стимулює диференціацію шванівських клітин, підвищує провідність нервових імпульсів і чинить анальгетичний ефект. Саме тому метилкобаламін активно застосовується при полінейропатіях, гіпоксичних ураженнях мозку та інтоксикаціях важкими металами[20].

Отже, вітамін B_{12} є ключовим компонентом системи підтримання метаболічної, гематологічної та нервової рівноваги організму тварин. Його достатнє надходження з кормом або у складі вітамінно-мінеральних комплексів є обов'язковою умовою ефективного росту, нормалізації функції печінки, кровотворення, відтворення та адаптації тварин до стресових і токсичних чинників.

Загальновизнано, що вітамін Е характеризується високою антиоксидантною активністю і відіграє ключову роль у нейтралізації активних форм кисню, які спричиняють оксидативне ушкодження клітинних мембран і біомолекул[21]. Завдяки здатності виступати донором або переносником атомів водню, даний вітамін гальмує процеси пероксидного окиснення ліпідів. Ефективність дії вітаміну Е є надзвичайно високою – навіть за низької його концентрації у клітинних мембранах, він забезпечує надійний захист ліпідів і білків від оксидативного пошкодження та від впливу екзогенних активних форм кисню[22].

---

[19] Можина Т. Дефіцит вітаміну В12: за матеріалами мультидисциплінарного майстер-класу з проблем діагностики та лікування. *Український медичний часопис*. 2024. № 6. С. 57–60

[20] Сергієнко В. О., Сегін В. Б., Сергієнко О. О. Вітамін В12 і діабетичні нейропатії. *Міжнародний ендокринологічний журнал*. 2024. Т. 20, № 7. С. 481–490.

[21] Donnelly J., Appathurai A., Yeoh H. L., Driscoll K., Faisal W. Vitamin E in Cancer Treatment: A Review of Clinical Applications in Randomized Control Trials. *Nutrients*. 2022. Vol. 14, No. 20. Art. 4329.

[22] Гутий Б. В. Вплив Метісевіту на вміст вітамінів А і Е у крові бугайців за умов кадмієвого навантаження. *Вісник Сумського національного аграрного університету. Серія: Ветеринарна медицина*. 2016. № 11. С. 10–13.

Вітамін Е сприяє підвищенню резистентності організму до дії низьких температур, гіпоксії та інтенсивних фізичних навантажень. Йому притаманна виражена гепатопротекторна активність: він запобігає розвитку жирової дистрофії печінки за умов етанолової інтоксикації, зменшує оксидативні ушкодження гепатоцитів, послаблює негативний вплив бактеріальних токсинів, а також полегшує перебіг гострих гепатитів і цирозу, сприяючи нормалізації екскреції білірубіну[23].

Вітамін Е проявляє багатогранний позитивний вплив на організм тварин, зокрема активізує функціонування імунної системи, приймає участь у регуляції обмінних процесів, покращує мікроциркуляцію та підтримує еластичність судинних стінок. Він сприяє зниженню артеріального тиску, запобігає тромбоутворенню і підвищує оксигенацію крові, а також бере участь у процесах регенерації та відновлення тканин.

Антиоксидантна захисна функція токоферолу особливо виражена під час впливу ультрафіолетового випромінювання на шкіру, оскільки кератиноцити містять значну кількість цього вітаміну. Як основний жиророзчинний антиоксидант, вітамін Е здатний ефективно запобігати мутагенній та канцерогенній дії вільних радикалів, обмежуючи їх руйнівний вплив на клітинні структури[24].

Таким чином, антиоксидантна дія вітаміну Е полягає у перериванні ланцюгових реакцій перекисного окиснення в клітинних мембранах та нейтралізації активних форм кисню. Зокрема, γ-токоферол здатний захищати ліпіди, ДНК і білкові молекули від ушкоджувальної дії пероксинітриту[25].

Щодо ролі вітаміну Е у підтриманні стабільності клітинних мембран, літературні дані залишаються досить суперечливими. З одного боку, дефіцит α-токоферолу у складі мембран спричиняє підвищення їх проникності та дестабілізацію, що пов’язано з утворенням комплексів між жирними кислотами та лізофосфоліпідами у фосфоліпідному бішарі, внаслідок чого зменшується плинність мембранних фосфоліпідів. З іншого боку, α-токоферол здатний інгібувати активність

[23] Вудмаска І. В., Сачко С. Р., Петрук А. П., Пахолків Н. І., Гудима В. Ю., Скорохід А. В. Корекція біохімічних показників крові корів у перед- і післяотельний періоди шишками хмелю та вітаміном Е. *Науковий вісник Львівського національного університету ветеринарної медицини та біотехнологій імені С. З. Ґжицького. Серія: Ветеринарні науки*. 2019. Т. 21, № 95. С. 117–121.

[24] Shklar G., Schwartz J., Trickler D. P., Niukian K. Regression by vitamin E of experimental oral cancer. *Journal of the National Cancer Institute*. 1987. Vol. 78, No. 5. P. 987–992.

[25] Купша О. І. Морфофункціональні зміни в печінці мишей при тривалому надходженні в організм малих доз свинцю і вплив на них альфа-токоферолу та ербісолу : автореф. дис. … канд. біол. наук. Сімферополь, 2010. 17 с.

мембранозв'язаної фосфоліпази A_2, запобігаючи літичному руйнуванню фосфоліпідів і тим самим підтримуючи структурну цілісність мембран[26].

Вітамін Е, забезпечуючи рівновагу між прооксидантною та антиоксидантною системами, бере активну участь у регуляції функцій клітин імунної системи, зокрема у процесах інтеграції та функціонування мембранних ліпідів, білків і нуклеїнових кислот, а також у контролі експресії генів[27].

Вітамін Е проявляє імуностимулювальний вплив, посилюючи передачу сигналів, що активують імунокомпетентні клітини під час формування імунної відповіді. Зокрема, вітамін підсилює сигнальні шляхи, які стимулюють синтез інтерлейкіну-2 та інтерферонів $CD4^+$ лімфоцитами. Крім того, вітамін Е перешкоджає утворенню ковалентних зв'язків між низькомолекулярними сполуками та білками крові й печінки, зокрема за дії іонізуючого випромінювання. Завдяки цьому зменшується агрегація імунних комплексів і попереджається ушкодження біомолекул[28].

У сучасних умовах техногенного навантаження, підвищеної інтенсивності виробництва та стресових впливів на тварин комплексне застосування вітамінів разом із метаболічними коректорами (L-карнітин, метіонін, селен, цинк) забезпечує посилення антиоксидантного захисту, активацію репараційних процесів, покращення функціонального стану печінки та підтримання імунної реактивності. Такі комбінації сприяють збереженню здоров'я тварин, підвищенню продуктивності та біологічної повноцінності продукції тваринництва.

3. Біологічна роль селену, цинку та метіоніну у підтриманні антиоксидантного статусу та метаболічної рівноваги організму тварин

Серед мікроелементів і біогенних сполук, що забезпечують антиоксидантний захист організму тварин, особливе значення мають селен, цинк і метіонін[29]. Вони беруть участь у нейтралізації вільних радикалів,

[26] Karpiuk I., Wilczura-Wachnik H., Myśliński A. α-Tocopherol/AOT/alkane/water system. *Journal of Thermal Analysis and Calorimetry*. 2017. Vol. 131, No. 3. P. 2885–2892.

[27] Naksuriya O., Okonogi S. Comparison and combination effects on antioxidant power of curcumin with gallic acid, ascorbic acid, and xanthone. *Drug Discoveries & Therapeutics*. 2015. Vol. 9, No. 2. P. 136–141.

[28] Lewis E. D., Meydani S. N., Wu D. Regulatory role of vitamin E in the immune system and inflammation. *IUBMB Life*. 2018. Vol. 71, No. 4. P. 487–494.

[29] Bashchenko M. I., Boiko O. V., Lesyk Y. V., Honchar O. F., Havrysh O. M., Gutyj B. V., Hoivanovych N. K., Krechkivska H. V. Changes in the blood parameters of rabbits consuming a complex of citrates of zinc, selenium, and germanium under the conditions of heat stress. *Regulatory Mechanisms in Biosystems*. 2024. Vol. 15, No. 4. P. 702–708.

підтриманні структурної цілісності клітинних мембран, а також у регуляції білкового, ліпідного й енергетичного обміну. У сучасній ветеринарній практиці дані речовини розглядаються як ключові метаболічні коректори, що сприяють адаптації тварин до впливу токсичних і стресових чинників.

За даними наукових джерел, селен є одним із найефективніших антиоксидантів прямої дії та потужним імуномодулятором, який захищає клітини від ушкоджувальної дії вільних радикалів і активних форм кисню, регулюючи інтенсивність процесів пероксидного окиснення ліпідів. У комплексі вітамін Е та селен проявляють синергічну дію, демонструючи виражені антиоксидантні властивості, що полягають у перериванні ланцюгових реакцій перекисного окиснення ліпідів[30].

Надходження селену в фізіологічно обґрунтованих кількостях сприяє оптимальній експресії біоактивних селенопротеїнів, більшість із яких містять селеноцистеїн (Sec) у своєму складі та характеризуються ферментативною активністю, зумовленою наявністю атома селену в каталітичному центрі. Селенопротеїни (SePP) виконують ключову роль у регуляції численних клітинних процесів: ензими глутатіонпероксидазного комплексу (GPx) забезпечують антиоксидантний захист клітин, каталізуючи відновлення органічних гідропероксидів і перекису водню; йодтиронін-дейодинази контролюють активність гормонів щитоподібної залози, впливають на проліферацію клітин та модулюють імунну відповідь[31].

У дослідженнях Ковальчук І. І., Проданчук О. В. та співавт. (2024) доведено, що селен у формі цитрату чинить виражений позитивний вплив на гематологічні показники, фізіолого-біохімічний стан і продуктивність кролів. Введення нанотехнологічного цитрату селену у питну воду тварин у концентраціях 50–200 мкг/л сприяло підвищенню кількості еритроцитів, рівня гемоглобіну та лейкоцитів, а також покращенню інтенсивності росту та середньодобових приростів маси тіла. Дослідники підкреслюють, що селен активує процеси гемопоезу, стимулює синтез протеїнів і ензимів антиоксидантної системи, сприяє підвищенню резистентності організму, а також бере участь у підтриманні метаболічної рівноваги. За тривалішого використання цитрату селену спостерігали зростання вмісту гемоглобіну на 8,6–10,2 % та підвищення

[30] Ковальова І. В., Антоненко П. П. Динаміка змін продуктивних якостей курей за впливу селену та фітодобавок. *Проблеми зооінженерії та ветеринарної медицини : зб. наук. праць Харківської державної зооветеринарної академії*. Харків, 2018. Т. 35, № 3. С. 145–150.

[31] Schomburg L. The other view: the trace element selenium as a micronutrient in thyroid disease, diabetes, and beyond. *Hormones (Athens)*. 2020. Vol. 19, No. 1. P. 15–24.

кількості лейкоцитів на 30–34 % порівняно з контролем. Це вказує про активацію лейкопоетичної функції кісткового мозку та посилення імунної відповіді[32].

Селен функціонує у тісній взаємодії з вітамінами А, Е та С, а також із каротиноїдами й глутатіоном. Ці речовини утворюють єдину систему антиоксидантного захисту клітини, де кожен компонент виконує синергічну функцію: токоферол і аскорбінова кислота відновлюють окиснені форми глутатіону, а селен у складі глутатіонпероксидази знешкоджує гідропероксиди[33].

Відомо, що селен виконує подвійну функцію в регуляції відтворювальної здатності організму бугаїв. У складі плазми сперми він наявний як компонент селензалежної глутатіонпероксидази (ГП), яка забезпечує антиоксидантний захист сперматозоїдів, тоді як у самих сперматозоїдах селен входить до складу структурних елементів клітини, підтримуючи їхню цілісність і функціональну активність[34].

Установлено, що селенометіонін засвоюється значно краще, ніж неорганічні форми селену (селеніт натрію), що робить органічні сполуки більш ефективними та менш токсичними. Саме тому в сучасній ветеринарії перевагу віддають селеноорганічним препаратам, таким як Сел-Плекс, які забезпечують оптимальне надходження мікроелемента без ризику отруєння[35].

Селен виступає ключовим мікроелементом імунної регуляції, впливаючи як на клітинну, так і на гуморальну ланки імунітету тварин. Дефіцит даного елементу супроводжується зниженням активності фагоцитів, проліферації лімфоцитів, синтезу імуноглобулінів та

---

[32] Ковальчук І. І., Проданчук О. В., Лесик Я. В., Цам М. М., Пилипець А. З., Колотницький В. А. Фізіолого-біохімічні показники крові і продуктивність кролів за випоювання нанотехнологічного селену цитрату. *Ефективне кролівництво і звірівництво*. 2024. № 10. С. 144–156.

[33] Ніщеменко М. П., Козій В. І., Трокоз В. О., Омельчук О. В., Порошинська О. А., Стовбецька Л. С., Ємельяненко А. А. Зміни активності лужної та кислої фосфатази і показників мінерального обміну в організмі курок-несучок за згодовування нанохелітів селену, цинку та токоферолу. *Біоресурси і природокористування*. 2019. Т. 11, № 5–6. С. 185–193

[34] Слободян С. О., Гутий Б. В., Мурська С. Д. Вплив селеніту натрію і кормової добавки «Метісевіт плюс» на морфологічні показники крові щурів за інтоксикації кадмієм і свинцем. *Науковий вісник Львівського національного університету ветеринарної медицини та біотехнологій імені С. З. Гжицького. Серія: Ветеринарні науки*. 2020. Т. 22, № 97. С. 52–57

[35] Федорченко А. М., Івченко В. М. Показники імунобіологічної реактивності та антиоксидантної системи глибокотільних корів під впливом селеноргані́чного препарату Сел-Плекс. *Науковий вісник ветеринарної медицини : зб. наук. праць*. Біла Церква, 2012. Вип. 10 (99). С. 112–116.

інтерферонів, що підвищує сприйнятливість молодняку до інфекційних захворювань[36].

Крім того, селен здатний підвищувати ефективність вакцинації, зменшуючи поствакцинальний стрес і посилюючи формування специфічного імунітету. Цей ефект обумовлений стимуляцією лейкопоезу, синтезу цитокінів і підвищенням експресії рецепторів на лімфоцитах, що покращує міжклітинну взаємодію в імунній відповіді[37].

Імуномодулювальна дія селену проявляється як на гуморальному, так і на клітинному рівнях функціонування імунної системи. Доведено, що дефіцит даного мікроелемента супроводжується зменшенням синтезу антитіл, порушенням диференціювання тимоцитів, зниженням активності фагоцитів і проліферації лімфоцитів, що в цілому веде до ослаблення вродженого та адаптивного імунітету[38].

Дефіцит селену призводить до зниження синтезу імуноглобулінів класів IgG та IgM, водночас не впливаючи істотно на рівень IgA. Додавання цього мікроелемента до раціону частково компенсує дефіцит вітаміну Е, нормалізуючи вміст IgA та IgG. Встановлено, що у корів, яким згодовували корми з додатковим вмістом 120 мкг селену на кілограм, рівень IgG у сироватці крові був вищим, ніж у контрольних тварин. Аналогічна тенденція спостерігалася і в телят, народжених від цих корів, – після споживання молозива вміст IgG у їхній крові перевищував показники контрольної групи. Таким чином, збагачення раціону селеном сприяє підвищенню життєздатності як матерів, так і потомства. Важливу роль селену в реалізації імунної відповіді підтверджує підвищенням активності селенофосфатсинтетази в Т-лімфоцитах під час їх активації – ферменту, що каталізує утворення селеноцистеїну, необхідного для синтезу селенопротеїнів[39].

Водночас біологічна доступність сполук Селену та інтенсивність включення елементу до складу протеїнів значно підвищується за високого вмісту в раціоні іонів Цинку. Цинк стимулює ріст та розвиток організму

---

[36] Ніщеменко М. П., Козій В. І., Трокоз В. О., Омельчук О. В., Порошинська О. А., Стовбецька Л. С., Ємельяненко А. А. Зміни активності лужної та кислої фосфатази і показників мінерального обміну в організмі курок-несучок за згодовування нанохелітів селену, цинку та токоферолу. *Біоресурси і природокористування*. 2019. Т. 11, № 5–6. С. 185–193.

[37] Івченко В. М., Федорченко А. М. Вплив селеновмісного препарату Сел-Плекс на імунобіологічні показники телят, імунізованих проти сальмонельозу. *Науковий вісник ветеринарної медицини* : зб. наук. праць. Біла Церква, 2011. Вип. 8, № 87. С. 45–50.

[38] Dhur A., Galan P., Hercberg S. Relationship between selenium, immunity and resistance against infection. *Comparative Biochemistry and Physiology. Part C: Comparative Pharmacology and Toxicology*. 1990. Vol. 96, No. 2. P. 271–280.

[39] Гаранович І. І. Імунний статус великої рогатої худоби в критичні періоди. *Фізіологічний журнал*. 1997. № 3–4. С. 19–24.

тварин завдяки активації механізмів синтезу протеїну, що сприяє збільшенню м'язової маси та загальному росту. Також є кофактором більше 300 ензимів, що приймають участь у біохімічних реакціях, процесах метаболізму протеїнів, вуглеводів, нуклеїнових кислот та антиоксидантного захисту. Він активує ензими, що приймають участь у метаболізмі глюкози, зокрема глюкозо-6-фосфатдегідрогеназу[40]. Даний ензим є ключовим у процесі гліколізу, оскільки перетворює глюкозу в енергію у вигляді молекул АТФ. Цинк забезпечує стабільний рівень енергії в організмі, що є важливим для нормального функціонування органів і систем під час стресових умов[41].

Надлишкове надходження цинку може мати антагоністичний вплив на метаболізм міді, заліза й кальцію, тому важливо дотримуватись оптимального співвідношення мікроелементів у раціоні тварин[42].

Цинк належить до найважливіших мікроелементів організму, виконуючи ключову роль у функціонуванні понад 300 ферментів і беручи участь у всіх основних біохімічних процесах, які залежать від їхньої активності. Він є каталізатором, структурним компонентом і регуляторним іоном, що забезпечує нормальний перебіг імунних реакцій[43].

Цинк необхідний для росту, диференціації та функціонування клітин імунної системи, зокрема нейтрофілів, природних кілерів і Т-лімфоцитів, які відіграють вирішальну роль у вродженому та адаптивному імунітеті. Він бере участь у синтезі ДНК, клітинному поділі та активації імунних клітин, забезпечуючи ефективну імунну відповідь. Дефіцит цинку спричиняє пригнічення імунної функції, зниження продукції цитокінів, активності лімфоцитів і підвищує сприйнятливість організму до інфекційних агентів. Крім того, цинк проявляє антиоксидантні та протизапальні властивості, які допомагають захищати клітини від оксидативного ушкодження та регулювати інтенсивність імунних реакцій[44].

---

[40] Dzen Y., Rosalovsky V., Shtapenko O., Slypaniuk O., Salyha Y. Effect of zinc methionine supplementation on biochemical and hematological indices of growing rabbits. *Bulgarian Journal of Agricultural Science*. 2023. Vol. 29, No. 4. P. 714–722.

[41] Юзьвяк М. О., Лесик Я. В. Клінічні параметри організму кролів за умов теплового стресу та впливу наночастинок цинку, селену і германію цитратів. *Ефективне кролівництво і звірівництво*. 2024. № 10. С. 169–184.

[42] Григорова Н. В. Динаміка вмісту цинку, магнію та міді в клітинах тимуса тварин за умов введення сульфатів цих металів. *Український журнал природничих наук*. 2025. № 12. С. 53–60.

[43] Haase H., Ellinger S., Linseisen J., Neuhäuser-Berthold M., Richter M., German Nutrition Society (DGE). Revised D-A-CH-reference values for the intake of zinc. *Journal of Trace Elements in Medicine and Biology*. 2020. Vol. 61. Art. 126536.

[44] Нефьодова О. О., Янушкевич К. С. Інтоксикаційний вплив солей свинцю та кадмію на печінку щурів із корекцією сукцинатами цинку та заліза. *Перспективи та інновації науки* (Серія «Педагогіка», Серія «Психологія», Серія «Медицина»). 2024. № 2. С. 1170–1183.

Цинк входить до активних центрів металоензимів і бере участь у формуванні фермент-цинк-субстратних комплексів, без яких взаємодія ензиму з субстратом є неможливою. Крім того, іони цинку є структурним компонентом численних неферментативних металопротеїнів, де вони стабілізують вторинну та третинну структуру білкових молекул, забезпечуючи їх функціональну активність і конформаційну стійкість[45].

Цинк впливає на багато аспектів функціонування імунної системи, відіграючи ключову роль у розвитку та диференціації клітин. Його дефіцит призводить до порушення роботи макрофагів, зокрема процесу фагоцитозу, а також негативно відбивається на дозріванні та активності Т- і В-лімфоцитів. Такі зміни є наслідком дисрегуляції основних біологічних процесів на клітинному рівні.

Крім того, нестача цинку знижує секрецію і біологічну активність цитокінів – основних сигнальних молекул імунної системи[46]. Це, у свою чергу, зменшує ефективність імунної відповіді та підвищує схильність організму до вірусних інфекцій.

Цинк є необхідним елементом для підтримання бар'єрної функції клітинних мембран. За даними досліджень, дефіцит Zn призводить до підвищення проникності міжклітинних з'єднань епітелію кишечника, особливо в зонах щільних і адгезивних контактів. Це супроводжується активацією міграції нейтрофілів, зростанням синтезу прозапальних цитокінів і надмірною інтенсивністю запальної відповіді. У результаті таких змін відбувається розвиток ускладнень і формується затяжний або хронічний перебіг запальних процесів у кишечнику[47].

Підтримання гомеостазу цинку є необхідною умовою для нормального функціонування імунної системи, зокрема для процесів кровотворення, дозрівання та диференціювання клітин, а також для збереження стабільного внутрішньоклітинного гомеостазу цинку і повноцінної активності імунокомпетентних клітин[48].

Поряд із цинком, важливу роль у забезпеченні метаболічної рівноваги та імунної стійкості організму відіграє метіонін – незамінна сірковмісна амінокислота, яка виступає попередником багатьох біологічно активних

---

[45] Акімов О. Є., Кузнецова Т. Ю., Соловйова Н. В., Міщенко А. В., Заколодна О. Е., Соловйов В. В. Роль цинку в організмі людини та шляхи подолання його дефіциту. *Актуальні проблеми сучасної медицини*. 2023. Т. 23, № 3. С. 246–249.

[46] Li D., Stovall D. B., Wang W., Sui G. Advances of zinc signaling studies in prostate cancer. *International Journal of Molecular Sciences*. 2020. Vol. 21, No. 2. Art. 667.

[47] Lazzerini M., Wanzira H. Oral zinc for treating diarrhoea in children. *The Cochrane Database of Systematic Reviews*. 2016. No. 12. Art. CD005436.

[48] Maares M., Haase H. Zinc and immunity: An essential interrelation. *Archives of Biochemistry and Biophysics*. 2016. Vol. 611. P. 58–65.

сполук, зокрема S-аденозилметіоніну, цистеїну та глутатіону. Завдяки цьому метіонін бере участь у реакціях метилювання, антиоксидантному захисті клітин і детоксикаційних процесах[49].

Він тісно пов'язаний із мікроелементами антиоксидантної дії, такими як селен і цинк, оскільки забезпечує синтез глутатіону – ключового ендогенного антиоксиданту, що підтримує редокс-гомеостаз і стабільність клітинних структур. Отже, метіонін розглядається не лише як амінокислота білкового обміну, а й як важливий регулятор антиоксидантної системи організму[50].

Метіонін бере участь у синтезі цистеїну, карнітину, адреналіну, холіну, а також сприяє детоксикації печінки шляхом активації метилтрансферазних систем. Завдяки цим властивостям метіонін проявляє гепатопротекторну та антиоксидантну дію, знижує рівень ліпідної інфільтрації гепатоцитів і підтримує синтезуючу функцію печінки. Крім того, метіонін бере участь у синтезі білків і фосфоліпідів, сприяє регенерації клітин, регулює вміст гомоцистеїну в крові, тим самим зменшуючи ризик оксидативного стресу[51].

Отримані результати Андрієнком Л. М. (2019) підтверджують, що метіонін є лімітуючою амінокислотою у формуванні м'язової маси, синтезі структурних білків і ферментів. Його достатнє надходження сприяє підвищенню енергетичної ефективності обміну речовин, зниженню катаболізму і покращенню засвоєння азоту, що відображається у підвищених приростах живої маси[52].

Метіонін сприяє нормальному функціонуванню підшлункової залози та бере участь у синтезі й обміні холіну, вітаміну B_{12} і фолієвої кислоти, разом із якою забезпечує ефективніше використання ліпідів корму тваринами. Ця незамінна амінокислота є важливою для росту, регенерації та поділу клітин, а також – разом із цистином – виступає основним структурним компонентом кератину, необхідного для формування вовни у овець та пір'я у птиці. За даними низки дослідників, метаболізм

---

[49] Янко Р. В. Вплив метіоніну на морфологічні зміни щитоподібної залози щурів. *Ендокринологія*. 2019. Т. 24, № 1. С. 41–45.

[50] Андрієнко Л. М. Вплив різних джерел метіоніну на живу масу та прирости молодняку кролів. *Аграрна наука та харчові технології*. 2019. Т. 5, № 1. С. 112–120

[51] Ostapyuk A. O., Gutyj B. V., Kozenko O. V., Dvyliuk I. V., Shcherbatyi A. R., Magrelo N. V., Martyshuk T. V., Klym H. V., Krempa N. Yu., Vus U. M., Vysotskyi A. O. The influence of milk thistle, metifen and silimevit on the protein synthesis function of the liver of laying hens under cadmium load. *Scientific Messenger of Lviv National University of Veterinary Medicine and Biotechnologies. Series: Veterinary Sciences*. 2024. Vol. 26, No. 115. P. 57–63.

[52] Андрієнко Л. М. Вплив різних джерел метіоніну на живу масу та прирости молодняку кролів. *Аграрна наука та харчові технології*. 2019. Т. 5, № 1. С. 112–120.

метіоніну тісно пов'язаний із обміном цинку, що вказує на їхню взаємну участь у процесах білкового синтезу та трофічного забезпечення клітин[53].

Суттєвим є те, що метіонін належить до ліпотропних сполук, які запобігають розвитку жирової дистрофії печінки. Завдяки наявності метильних груп, він бере участь у синтезі фосфоліпідів, які використовуються клітинами печінки для регенерації та відновлення структурних компонентів, а їх надлишок із током крові транспортується до інших органів і тканин. Метіонін також стимулює утворення холіну, що у поєднанні з триацилгліцеролами формує холінфосфатиди, які забезпечують виведення ліпідів із печінки в кров'яне русло, запобігаючи накопиченню жирів і розвитку гепатодистрофії[54] [119].

Результати дослідження Р. В. Янко вказують, що додаткове введення метіоніну у дозі 250 мг/кг стимулює синтетичну активність щитоподібної залози, викликаючи зменшення колоїду, посилення секреції гормонів і регенеративних процесів у паренхімі. Це підтверджує, що метіонін може використовуватися як метаболічний коректор ендокринної функції, сприяючи стабілізації обмінних процесів і підвищенню адаптивних можливостей організму тварин за дії стресових або токсичних чинників [107].

У комплексному застосуванні селен, цинк і метіонін мають виражений синергічний ефект, підсилюючи антиоксидантну систему організму, зменшуючи прояви інтоксикацій і стимулюючи адаптаційно-захисні реакції. Їх поєднання з вітамінами Е та B_{12} доцільне для метаболічної корекції у тварин, які перебувають під впливом токсикантів (зокрема солей важких металів), у періоди інтенсивного росту, лактації чи репродуктивної активності.

ВИСНОВКИ

Сучасні підходи до підвищення резистентності організму тварин передбачають використання антиоксидантів, вітамінів, мікроелементів і вітаміноподібних речовин, що нормалізують клітинний метаболізм і підтримують функціональну активність антиоксидантної системи. Серед них особливе значення мають вітаміни Е, B_{12}, селен, цинк, метіонін і L-карнітин, які проявляють виражені гепатопротекторні, антиоксидантні, антигіпоксичні та імуномодулювальні властивості. Їх поєднане застосування сприяє активації глутатіонпероксидазної системи, стабілізації клітинних мембран, запобіганню накопиченню

[53] Кіщак І. Т. Виробництво і застосування премікcів. Київ : Урожай, 1995. 350 с.

[54] Church D. C., Pond W. G. Basic animal nutrition and feeding. New York : John Wiley & Sons, 1998. 472 p.

токсичних метаболітів, а також підвищує стійкість тварин до дії техногенних факторів.

Отже, зростання техногенного навантаження на агроекосистеми вимагає розроблення та впровадження комплексних біохімічних і фізіологічних методів корекції, спрямованих на зменшення токсичного впливу важких металів. Використання антиоксидантів, мікроелементів і вітаміноподібних сполук є ефективним напрямом профілактики метаболічних порушень і підтримання гомеостазу у тварин, забезпечуючи збереження їхнього здоров'я, продуктивності та якості тваринницької продукції в умовах антропогенного тиску.

АНОТАЦІЯ

Обґрунтовано доцільність комплексного застосування антиоксидантів, вітамінів і метаболічних коректорів як ефективного напряму профілактики та корекції токсико-індукованих порушень. Узагальнено дані щодо ролі L-карнітину як метаболічного коректора з антиоксидантною, антистресовою, мембранопротекторною та імуномодулювальною дією; розкрито значення вітамінів Е і B_{12} у підтриманні метаболічної рівноваги, кровотворення, функціонального стану печінки та імунної реактивності. Окрему увагу приділено біологічній ролі селену, цинку та метіоніну як ключових компонентів антиоксидантної системи, кофакторів ферментів захисту (глутатіонпероксидаза, супероксиддисмутаза) і регуляторів детоксикаційних процесів. Підкреслено синергічний ефект поєднаного використання зазначених нутрієнтів і метаболічних коректорів у схемах профілактики та лікування, що забезпечує зміцнення природної резистентності, підвищення адаптаційного потенціалу та стабілізацію продуктивності тварин в умовах техногенного навантаження.

Література

1. Мартишук Т. В., Гутий Б. В. Імунофізіологічний стан та антиоксидантний потенціал організму поросят за умов оксидаційного стресу та дії коригуючих чинників : монографія. Львів : СПОЛОМ, 2021. 108 с.

2. Li J., Liu L., Weng J., Yin T. L., Yang J., Feng H. L. Biological roles of l-carnitine in oocyte and early embryo development. *Molecular reproduction and development.* 2021. Vol. 88, no. 10. P. 673–685.

3. Karam K. M., Alebady A. S., Al-Nailey K. G. C., Al-Delemi D. H. J. L-Carnitine effect on induced hyperlipidemia on premature rats: fertility profile. *Journal of medicine and life.* 2022. Vol. 15, no 1. P. 124–131.

4. Єфімов В. Г., Костюшкевич К. Л., Дідик К. О., Алексєєва Н. В. Вплив L-карнітину наморфологічні показники крові поросяту період

відлучення. *Вісник Дніпропетровського державного аграрного університету*. 2011. № 2. URL: http://nbuv.gov.ua/UJRN/vddau_2011_2_28

5. Криницька І. Я., Марущак М. І., Лазарчук О. В., Мудра А. Є., Яворська С. І., Габор Г. Г. Вплив карнітину хлориду на показники протеїназо-інгібіторної системи у щурів за умови гострого алкогольного отруєння на тлі інтоксикації солями кадмію та свинцю. *Здобутки клінічної і експериментальної медицини.* 2010. № 1. С. 79–82.

6. Гембаровський М. В. (2013). Вплив L-карнітину на показники ендогенної інтоксикації за умови експериментального токсичного ураження парацетамолом на тлі харчової депривації. *Медична хімія*. 2013. Т. 15, № 2. С. 68–71.

7. Gu S., Wang W., Ye G., Chen C., Zhou Y., Guo L., Zhong S., Li X., Fu X., Wen C., Tang L., Sun J., Hou J., Li Y. Hepatocyte-Derived L-Carnitine Restricts Hepatitis B Surface Antigen Loss Through an Immunosuppressive Effect on Germinal Center-Related Immune Cells. *The Journal of Infectious Diseases.* 2022. Vol. 225, No. 11. P. 1955–1966.

8. Цехмістренко С. І., Коберська В. А. Активність ферментів антиоксидантного захисту в еякулятах бугаїв за додавання L-карнітину до розріджувача сперми. *Технологія виробництва і переробки продукції тваринництва.* 2012. № 8. С. 116–119.

9. Коберська В. А. Вплив L-карнітину у складі раціону бугаїв на ліпідний склад та якість сперми. *Біологія тварин*. 2015. Т. 17, № 1. С. 62–67.

10. Загайко А. Л., Брюханова Т. О., Шинкарьов А. А., Мельник Н. В. Метаболічні ефекти карнітину, роль у розвитку патологій та перспективи клінічного застосування (огляд). *Український біофармацевтичний журнал*. 2016. № 6. С. 17–22.

11. Присяжнюк В. П. Ефективність застосування L-карнітину у комплексному лікуванні хворих на неалкогольну жирову хворобу печінки. *Гепатологія*. 2017. № 1. С. 40–48.

12. Демків І. Я. Вплив карнітину хлориду на показники імунітету та стан антиоксидантної системи у тварин із гострим отруєнням етиловим спиртом на фоні тривалої інтоксикації солями свинцю і кадмію. *Науковий вісник Ужгородського університету. Серія: Медицина.* 2008. Вип. 33. С. 44–49.

13. П'ятничко О. М., Жила М. І., Шкодяк Н. В., Салій О. О., Деркач М. В., Калиновська Л. В. Ефективність застосування препарату на основі бутафосфану, вітамінів групи В та L-карнітину при лікуванні коней. *Науковий вісник Львівського національного університету ветеринарної медицини та біотехнологій імені С. З. Ґжицького. Серія: Ветеринарні науки*. 2021. Т. 23, № 101. С. 31–37.

14. Лучин І. С., Сотніченко Ю. М., Невесенко А. В., Білан А. П. Безпечність і продуктивна дія препарату L-карнітину на інтенсивність росту молодняку кролів. *Ефективне кролівництво і звірівництво*. 2024. № 10. С. 100–112.

15. Lavryshyn Y., Gutyj B., Zhyla M., Kurylas L., Prysiazhniuk V., Khariv I., Voroniak V. Influence of "Metisevit" feed additive and liposomal preparation "Lipointersil" on the level of vitamins in the blood of bulls at experimental chronic cadmium toxicosis. *Scientific Messenger of LNU of Veterinary Medicine and Biotechnologies. Series: Veterinary Sciences*. 2020. Vol. 22, No. 100. P. 88–93.

16. Гутий Б. В. Вміст вітамінів А і Е у крові бичків за умов кадмієвої інтоксикації. *Вісник Сумського національного аграрного університету. Серія: Ветеринарна медицина*. 2013. № 2. С. 31–33.

17. Al Amin A. S. M., Gupta V. Vitamin B12 (Cobalamin). *StatPearls*. Treasure Island (FL) : StatPearls Publishing, 2023

18. Golovach P., Gutyj B., Kolomiiets I., Ostapiv D., Oseredchuk R., Sloboda O. The effect of B groups vitamins (B1, B2, B5, B6, B10, B12) on the activity of antioxidant protection system enzymes and the content of lipid peroxide oxidation products in the blood of feeding cattle. *Scientific Messenger of LNU of Veterinary Medicine and Biotechnologies. Series: Veterinary Sciences*. 2023. Vol. 25, No. 112. P. 22–26.

19. Можина Т. Дефіцит вітаміну В12: за матеріалами мультидисциплінарного майстер-класу з проблем діагностики та лікування. *Український медичний часопис*. 2024. № 6. С. 57–60.

20. Сергієнко В. О., Сегін В. Б., Сергієнко О. О. Вітамін В12 і діабетичні нейропатії. *Міжнародний ендокринологічний журнал*. 2024. Т. 20, № 7. С. 481–490.

21. Donnelly J., Appathurai A., Yeoh H. L., Driscoll K., Faisal W. Vitamin E in Cancer Treatment: A Review of Clinical Applications in Randomized Control Trials. *Nutrients*. 2022. Vol. 14, No. 20. Art. 4329.

22. Гутий Б. В. Вплив Метісевіту на вміст вітамінів А і Е у крові бугайців за умов кадмієвого навантаження. *Вісник Сумського національного аграрного університету. Серія: Ветеринарна медицина*. 2016. № 11. С. 10–13.

23. Вудмаска І. В., Сачко С. Р., Петрук А. П., Пахолків Н. І., Гудима В. Ю., Скорохід А. В. Корекція біохімічних показників крові корів у перед- і післяотельний періоди шишками хмелю та вітаміном Е. *Науковий вісник Львівського національного університету ветеринарної медицини та біотехнологій імені С. З. Ґжицького. Серія: Ветеринарні науки*. 2019. Т. 21, № 95. С. 117–121.

24. Shklar G., Schwartz J., Trickler D. P., Niukian K. Regression by vitamin E of experimental oral cancer. *Journal of the National Cancer Institute*. 1987. Vol. 78, No. 5. P. 987–992.

25. Купша О. І. Морфофункціональні зміни в печінці мишей при тривалому надходженні в організм малих доз свинцю і вплив на них альфа-токоферолу та ербісолу : автореф. дис. … канд. біол. наук. Сімферополь, 2010. 17 с.

26. Karpiuk I., Wilczura-Wachnik H., Myśliński A. α-Tocopherol/AOT/alkane/water system. *Journal of Thermal Analysis and Calorimetry*. 2017. Vol. 131, No. 3. P. 2885–2892.

27. Naksuriya O., Okonogi S. Comparison and combination effects on antioxidant power of curcumin with gallic acid, ascorbic acid, and xanthone. *Drug Discoveries & Therapeutics*. 2015. Vol. 9, No. 2. P. 136–141.

28. Lewis E. D., Meydani S. N., Wu D. Regulatory role of vitamin E in the immune system and inflammation. *IUBMB Life*. 2018. Vol. 71, No. 4. P. 487–494.

29. Bashchenko M. I., Boiko O. V., Lesyk Y. V., Honchar O. F., Havrysh O. M., Gutyj B. V., Hoivanovych N. K., Krechkivska H. V. Changes in the blood parameters of rabbits consuming a complex of citrates of zinc, selenium, and germanium under the conditions of heat stress. *Regulatory Mechanisms in Biosystems*. 2024. Vol. 15, No. 4. P. 702–708.

30. Ковальова І. В., Антоненко П. П. Динаміка змін продуктивних якостей курей за впливу селену та фітодобавок. *Проблеми зооінженерії та ветеринарної медицини : зб. наук. праць Харківської державної зооветеринарної академії*. Харків, 2018. Т. 35, № 3. С. 145–150.

31. Schomburg L. The other view: the trace element selenium as a micronutrient in thyroid disease, diabetes, and beyond. *Hormones (Athens)*. 2020. Vol. 19, No. 1. P. 15–24.

32. Ковальчук І. І., Проданчук О. В., Лесик Я. В., Цам М. М., Пилипець А. З., Колотницький В. А. Фізіолого-біохімічні показники крові і продуктивність кролів за випоювання нанотехнологічного селену цитрату. *Ефективне кролівництво і звірівництво*. 2024. № 10. С. 144–156.

33. Ніщеменко М. П., Козій В. І., Трокоз В. О., Омельчук О. В., Порошинська О. А., Стовбецька Л. С., Ємельяненко А. А. Зміни активності лужної та кислої фосфатази і показників мінерального обміну в організмі курок-несучок за згодовування нанохелітів селену, цинку та токоферолу. *Біоресурси і природокористування*. 2019. Т. 11, № 5–6. С. 185–193.

34. Слободян С. О., Гутий Б. В., Мурська С. Д. Вплив селеніту натрію і кормової добавки «Метісевіт плюс» на морфологічні показники крові

щурів за інтоксикації кадмієм і свинцем. *Науковий вісник Львівського національного університету ветеринарної медицини та біотехнологій імені С. З. Ґжицького. Серія: Ветеринарні науки*. 2020. Т. 22, № 97. С. 52–57.

35. Федорченко А. М., Івченко В. М. Показники імунобіологічної реактивності та антиоксидантної системи глибокотільних корів під впливом селенорганічного препарату Сел-Плекс. *Науковий вісник ветеринарної медицини : зб. наук. праць*. Біла Церква, 2012. Вип. 10 (99). С. 112–116.

36. Ніщеменко М. П., Козій В. І., Трокоз В. О., Омельчук О. В., Порошинська О. А., Стовбецька Л. С., Ємельяненко А. А. Зміни активності лужної та кислої фосфатази і показників мінерального обміну в організмі курок-несучок за згодовування нанохелітів селену, цинку та токоферолу. *Біоресурси і природокористування*. 2019. Т. 11, № 5–6. С. 185–193.

37. Івченко В. М., Федорченко А. М. Вплив селеновмісного препарату Сел-Плекс на імунобіологічні показники телят, імунізованих проти сальмонельозу. *Науковий вісник ветеринарної медицини : зб. наук. праць*. Біла Церква, 2011. Вип. 8, № 87. С. 45–50.

38. Dhur A., Galan P., Hercberg S. Relationship between selenium, immunity and resistance against infection. *Comparative Biochemistry and Physiology. Part C: Comparative Pharmacology and Toxicology*. 1990. Vol. 96, No. 2. P. 271–280.

39. Гаранович І. І. Імунний статус великої рогатої худоби в критичні періоди. *Фізіологічний журнал*. 1997. № 3–4. С. 19–24.

40. Dzen Y., Rosalovsky V., Shtapenko O., Slypaniuk O., Salyha Y. Effect of zinc methionine supplementation on biochemical and hematological indices of growing rabbits. *Bulgarian Journal of Agricultural Science*. 2023. Vol. 29, No. 4. P. 714–722.

41. Юзьвяк М. О., Лесик Я. В. Клінічні параметри організму кролів за умов теплового стресу та впливу наночастинок цинку, селену і германію цитратів. *Ефективне кролівництво і звірівництво*. 2024. № 10. С. 169–184.

42. Григорова Н. В. Динаміка вмісту цинку, магнію та міді в клітинах тимуса тварин за умов введення сульфатів цих металів. *Український журнал природничих наук*. 2025. № 12. С. 53–60.

43. Haase H., Ellinger S., Linseisen J., Neuhäuser-Berthold M., Richter M., German Nutrition Society (DGE). Revised D-A-CH-reference values for the intake of zinc. *Journal of Trace Elements in Medicine and Biology*. 2020. Vol. 61. Art. 126536.

44. Нефьодова О. О., Янушкевич К. С. Інтоксикаційний вплив солей свинцю та кадмію на печінку щурів із корекцією сукцинатами цинку

та заліза. *Перспективи та інновації науки* (Серія «Педагогіка», Серія «Психологія», Серія «Медицина»). 2024. № 2. С. 1170–1183.

45. Акімов О. Є., Кузнецова Т. Ю., Соловйова Н. В., Міщенко А. В., Заколодна О. Е., Соловйов В. В. Роль цинку в організмі людини та шляхи подолання його дефіциту. *Актуальні проблеми сучасної медицини*. 2023. Т. 23, № 3. С. 246–249.

46. Li D., Stovall D. B., Wang W., Sui G. Advances of zinc signaling studies in prostate cancer. *International Journal of Molecular Sciences*. 2020. Vol. 21, No. 2. Art. 667.

47. Lazzerini M., Wanzira H. Oral zinc for treating diarrhoea in children. *The Cochrane Database of Systematic Reviews*. 2016. No. 12. Art. CD005436

48. Maares M., Haase H. Zinc and immunity: An essential interrelation. *Archives of Biochemistry and Biophysics*. 2016. Vol. 611. P. 58–65.

49. Янко Р. В. Вплив метіоніну на морфологічні зміни щитоподібної залози щурів. *Ендокринологія*. 2019. Т. 24, № 1. С. 41–45.

50. Андрієнко Л. М. Вплив різних джерел метіоніну на живу масу та прирости молодняку кролів. *Аграрна наука та харчові технології*. 2019. Т. 5, № 1. С. 112–120.

51. Ostapyuk A. O., Gutyj B. V., Kozenko O. V., Dvyliuk I. V., Shcherbatyi A. R., Magrelo N. V., Martyshuk T. V., Klym H. V., Krempa N. Yu., Vus U. M., Vysotskyi A. O. The influence of milk thistle, metifen and silimevit on the protein synthesis function of the liver of laying hens under cadmium load. *Scientific Messenger of Lviv National University of Veterinary Medicine and Biotechnologies. Series: Veterinary Sciences*. 2024. Vol. 26, No. 115. P. 57–63.

52. Андрієнко Л. М. Вплив різних джерел метіоніну на живу масу та прирости молодняку кролів. *Аграрна наука та харчові технології*. 2019. Т. 5, № 1. С. 112–120.

53. Кіщак І. Т. Виробництво і застосування премікcів. Київ : Урожай, 1995. 350 с.

54. Church D. C., Pond W. G. Basic animal nutrition and feeding. New York : John Wiley & Sons, 1998. 472 p.

Information about the authors:
Vus Uliana Mykhailivna,
Senior Lecturer at the Department of Hygiene, Sanitation and General Veterinary Prevention named after Mykhailo Demchuk,
Stepan Gzhytskyi National University
of Veterinary Medicine and Biotechnologies Lviv
50, Pekarska street, Lviv, 79010, Ukraine

Hutyy Bohdan Volodymyrovych,
Doctor of Veterinary Sciences, Professor,
Head of the Department of Hygiene, Sanitation and General Veterinary
Prevention named after Mykhailo Demchuk,
Stepan Gzhytskyi National University
of Veterinary Medicine and Biotechnologies Lviv
50, Pekarska street, Lviv, 79010, Ukraine

CHAPTER 14

ТЕОРЕТИЧНІ ОСНОВИ СТВОРЕННЯ ГІДРОГЕЛЕВИХ СИСТЕМ З ПОЛІФЕНОЛАМИ

Дук Н. М.
DOI https://doi.org/10.30525/978-9934-26-654-6-14

ВСТУП

Розробка біоактивних гідрогелевих систем є одним із пріоритетних напрямів сучасної біотехнології та біоінженерії, зокрема у сфері дерматології та регенеративної медицини. Особливий інтерес викликає використання природних поліфенольних сполук як активних компонентів гідрогелів завдяки їх вираженим антиоксидантним, протизапальним та антисептичним властивостям. Водночас практичне застосування поліфенолів обмежується їх нестабільністю та низькою біодоступністю. У розділі здійснено аналіз сучасних підходів до створення гідрогелевих систем з поліфенолами, охарактеризовано основні типи біополімерних матриць та механізми біологічної дії поліфенольних сполук. Узагальнено результати досліджень європейських, американських та українських наукових шкіл, зокрема щодо використання альгінатних і хітозанових гідрогелів. Показано перспективність інтеграції поліфенолів у гідрогелеві системи для біомедичних і дерматологічних застосувань.

Сучасний етап розвитку науки характеризується активним пошуком інноваційних матеріалів і технологій, здатних забезпечити ефективну та безпечну доставку біологічно активних речовин до тканин організму. У цьому контексті гідрогелеві системи посідають особливе місце завдяки своїй тривимірній полімерній структурі, високому вмісту води та здатності імітувати властивості живих тканин[1]. Гідрогелі широко застосовуються у фармації, біомедицині, косметології та тканинній інженерії як матриці для контрольованого вивільнення активних компонентів.

Особливу увагу в останні роки приділяють біополімерним гідрогелям на основі природних полісахаридів і білків, зокрема натрій альгінату, хітозану, бактеріальної целюлози, гіалуронової кислоти та

[1] Ahmed E. M. Hydrogel: Preparation, characterization, and applications: A review. *Journal of Advanced Research*. 2015. Vol. 6, No. 2. P. 105–121. DOI: https://doi.org/10.1016/j.jare.2013.07.006

желатину[2]. Такі матеріали характеризуються високою біосумісністю, біодеградабельністю та низькою токсичністю, що робить їх привабливими для створення систем локальної дії. Водночас застосування гідрогелів як носіїв біоактивних сполук потребує глибокого теоретичного обґрунтування, зокрема з точки зору взаємодії полімерної матриці з активною речовиною та навколишнім біологічним середовищем.

Серед широкого спектра біологічно активних сполук особливе місце займають поліфеноли – вторинні метаболіти рослинного походження, що включають флавоноїди, фенольні кислоти, стильбени та інші класи сполук. Поліфеноли відомі своїми антиоксидантними, протизапальними, антибактеріальними та фотозахисними властивостями[3]. Саме ці характеристики зумовлюють інтерес до їх використання у складі дерматологічних і косметологічних засобів, зокрема для догляду за проблемною, пошкодженою або віковою шкірою.

Разом із тим практичне застосування поліфенолів обмежується низкою факторів, серед яких – нестабільність у водних середовищах, чутливість до світла та кисню, а також обмежена проникність через шкірний бар'єр. Використання гідрогелевих систем як носіїв поліфенолів дозволяє частково або повністю подолати зазначені недоліки за рахунок захисту активних молекул, пролонгованого вивільнення та локальної дії[4].

Наукові школи Європейського Союзу та США активно розвивають напрям створення так званих «інтелектуальних» гідрогелів (smart hydrogels), здатних реагувати на зміни pH, температури або інших зовнішніх чинників. Українські дослідження, зокрема виконані в Національному університеті «Львівська політехніка», зосереджені на розробці pH-залежних іонно зшитих гідрогелів на основі альгінату та хітозану для біомедичних застосувань[5].

Метою цього розділу є узагальнення та систематизація сучасних наукових даних щодо теоретичних основ створення гідрогелевих систем з поліфенолами, аналіз їх фізико-хімічних та біологічних властивостей,

---

[2] Caló E., Khutoryanskiy V. V. Biomedical applications of hydrogels: A review of patents and commercial products. *European Polymer Journal*. 2015. Vol. 65. P. 252–267. DOI: https://doi.org/10.1016/j.eurpolymj.2014.11.024

[3] Peppas N. A., Hilt, J. Z.; Khademhosseini, A.; Langer, R. Hydrogels in biology and medicine: From molecular principles to bionanotechnology. *Advanced Materials.* 2006. Vol. 18, No. 11. P. 1345–1360. DOI: https://doi.org/10.1002/adma.200501612

[4] Hoffman A. S. Hydrogels for biomedical applications. *Advanced Drug Delivery Reviews.* 2012. Vol. 64. P. 18–23. DOI: https://doi.org/10.1016/j.addr.2012.09.010

[5] Sannino A., Madaghiele M., Demitri C. Development and characterization of cellulose-based hydrogels for biomedical applications. *Journal of Applied Polymer Science.* 2009. Vol. 114, No. 6. P. 3662–3669. DOI: https://doi.org/10.1002/app.30956

а також визначення перспектив подальшого розвитку даного напряму в біотехнології та біоінженерії.

1. Аналіз сучасних тенденцій у створенні біоактивних гідрогелів

Гідрогелі на сучасному етапі розвитку біотехнології та біоінженерії розглядаються як один із найбільш перспективних класів м'яких функціональних матеріалів для біомедичних і дерматологічних застосувань. Їх унікальність зумовлена тривимірною полімерною сіткою, здатною утримувати значну кількість води або біологічних рідин, що забезпечує високу біосумісність і подібність до міжклітинного матриксу живих тканин. Саме ця властивість робить гідрогелі привабливими для використання як носіїв біологічно активних речовин.

Однією з ключових тенденцій сучасних досліджень є перехід від синтетичних полімерів до біополімерів природного походження. Такий підхід зумовлений необхідністю зменшення токсичності, покращення біодеградабельності та мінімізації імунологічних реакцій при контакті матеріалу з біологічними тканинами. До найбільш поширених біополімерів, що використовуються для створення гідрогелів, належать натрій альгінат, хітозан, каррагінан, бактеріальна целюлоза, гіалуронова кислота та желатин.

Альгінатні гідрогелі широко застосовуються завдяки простоті формування шляхом іонного зшивання з двовалентними катіонами, зокрема іонами кальцію. Такі системи характеризуються м'якою текстурою, високою здатністю до набухання та задовільною біосумісністю, що робить їх придатними для створення дерматологічних патчів і ранових покриттів. Водночас хітозанові гідрогелі вирізняються наявністю власної антибактеріальної активності, що суттєво розширює спектр їх застосування, зокрема для проблемної та пошкодженої шкіри.

Окрему увагу в сучасних дослідженнях приділяють гідрогелям на основі бактеріальної целюлози, які демонструють високу механічну міцність, прозорість і здатність щільно прилягати до поверхні шкіри, створюючи так званий ефект «другої шкіри». Такі системи активно досліджуються в країнах Європейського Союзу та США як платформи для пролонгованої доставки активних інгредієнтів у косметології та регенеративній медицині.

Наступним важливим напрямом є розробка так званих «інтелектуальних» або стимулочутливих гідрогелів (smart hydrogels). Ці системи здатні змінювати свої фізико-хімічні властивості у відповідь на зовнішні фактори, такі як pH, температура, іонна сила або ферментативна активність середовища. Наприклад, pH-чутливі гідрогелі можуть

використовуватися для цільового вивільнення активних речовин у зонах запалення, де спостерігається зниження кислотності шкірного середовища.

У сучасних публікаціях дедалі частіше акцентується увага на комбінованих гідрогелевих системах, що поєднують декілька типів полімерів або різні механізми зшивання. Такий підхід дозволяє оптимізувати механічні, реологічні та адгезивні властивості матеріалу без втрати його біологічної сумісності. Зокрема, поєднання гіалуронової кислоти з желатином або альгінату з хітозаном забезпечує баланс між еластичністю, міцністю та здатністю до контрольованого вивільнення активних компонентів[6].

Суттєвим трендом є також функціоналізація гідрогелів біологічно активними сполуками, серед яких важливе місце займають антиоксиданти, пептиди, ферменти та природні поліфеноли. Інтеграція таких речовин у полімерну матрицю дозволяє створювати не лише пасивні носії, а й активні терапевтичні та косметологічні системи[7]. У цьому контексті гідрогелі розглядаються як платформи для створення персоналізованих засобів догляду за шкірою з пролонгованою дією.

Українські наукові дослідження також демонструють активний розвиток цього напряму. Роботи, виконані в Національному університеті «Львівська політехніка», присвячені створенню pH-залежних гідрогелів на основі альгінату та хітозану, підтверджують можливість регулювання їхніх реологічних і транспортних властивостей шляхом варіювання складу та умов зшивання[8]. Це створює передумови для подальшої інтеграції поліфенольних сполук у такі системи.

Таким чином, аналіз сучасних тенденцій свідчить, що розвиток біоактивних гідрогелів відбувається в напрямі підвищення їх біосумісності, функціональності та адаптивності до умов біологічного середовища. Саме ці підходи створюють теоретичне підґрунтя для розробки гідрогелевих систем з поліфенолами, здатних поєднувати захисну, терапевтичну та косметологічну дію.

---

[6] Savka M. Z., Babin Ya. O., Kohut H. P. pH-sensitive hydrogels based on sodium alginate and chitosan. *Chemistry, Technology and Application of Substances*. 2017. Vol. 63. P. 63–70.

[7] Manach C., Scalbert A., Morand C., Rémésy C., Jiménez L. Polyphenols: food sources and bioavailability. *The American Journal of Clinical Nutrition.* 2004. Vol. 79, No. 5. P. 727–747. DOI: https://doi.org/10.1093/ajcn/79.5.727

[8] Pérez-Jiménez J., Neveu V., Vos F., Scalbert A. Identification of the 100 richest dietary sources of polyphenols. *European Journal of Clinical Nutrition.* 2010. Vol. 64 (Suppl. 3). P. S112–S120. DOI: https://doi.org/10.1038/ejcn.2010.221

2. Природні поліфенольні сполуки: класифікація, властивості, біологічна активність та методи одержання

Поліфенольні сполуки являють собою велику та структурно різноманітну групу вторинних метаболітів рослинного походження, що відіграють важливу роль у захисних механізмах рослин та водночас демонструють високу біологічну активність у відношенні до організму людини. У сучасній біотехнології поліфеноли розглядаються як перспективні біоактивні інгредієнти для фармацевтичних, косметологічних і дерматологічних застосувань.

З хімічної точки зору поліфеноли характеризуються наявністю однієї або декількох фенольних груп у структурі молекули, що зумовлює їх антиоксидантні властивості. Залежно від хімічної будови та біосинтетичного походження поліфенольні сполуки поділяють на кілька основних класів: фенольні кислоти, флавоноїди, стильбени, лігнани та таніни. Найбільш дослідженими з точки зору біологічної активності є флавоноїди, до яких належать кверцетин, катехіни, рутин та епігалокатехін-галат.

Фенольні кислоти, зокрема кавова, ферулова та галова кислоти, широко представлені у рослинній сировині та характеризуються вираженими антиоксидантними і протизапальними властивостями. Стильбени, представлені насамперед ресвератролом, привертають значну увагу дослідників завдяки їхній здатності модулювати клітинні сигнальні шляхи та знижувати рівень оксидативного стресу. Лігнани та таніни також демонструють біологічну активність, проте їх використання у складі гідрогелевих систем потребує додаткового вивчення через складність контролю вивільнення.

Біологічна активність поліфенолів зумовлена насамперед їх здатністю нейтралізувати вільні радикали, хелатувати іони металів та інгібувати ферментативні процеси, пов'язані із запаленням і старінням шкіри. У дерматологічних дослідженнях поліфеноли показали здатність зменшувати еритему, знижувати трансепідермальну втрату вологи та покращувати бар'єрні функції шкіри.

Важливим аспектом використання поліфенолів є методи їх одержання. Традиційно поліфенольні сполуки отримують шляхом екстракції з рослинної сировини з використанням органічних розчинників або водно-спиртових систем. У сучасних дослідженнях все більшої популярності набувають «зелені» технології екстракції, зокрема надкритична флюїдна екстракція, ультразвукова та мікрохвильова екстракція, що дозволяють підвищити вихід поліфенолів і зменшити негативний вплив на довкілля[9].

[9] Middleton E., Kandaswami C., Theoharides T. C. The effects of plant flavonoids on mammalian cells. *Pharmacological Reviews*. 2000. Vol. 52, No. 4. P. 673–751.

Окремий напрям становлять біотехнологічні методи отримання поліфенолів із використанням мікроорганізмів та клітинних культур рослин. Такі підходи забезпечують відтворюваність складу та високу чистоту кінцевого продукту, що є важливим для створення стандартизованих гідрогелевих систем[10]. Проте висока вартість і складність масштабування поки що обмежують широке промислове впровадження цих методів.

Незважаючи на значний потенціал поліфенолів, їх практичне застосування у складі косметологічних і дерматологічних засобів ускладнюється низькою стабільністю, фоточутливістю та схильністю до окиснення[11]. Саме ці обмеження обґрунтовують доцільність інтеграції поліфенольних сполук у гідрогелеві матриці, здатні захищати активні компоненти та забезпечувати їх контрольоване вивільнення.

3. Механізми антисептичної, антиоксидантної та протизапальної дії поліфенолів

Поліфенольні сполуки характеризуються широким спектром біологічної активності, що зумовлює їх інтенсивне вивчення у контексті біомедичних та дерматологічних застосувань. Особливу увагу приділяють антисептичним, антиоксидантним і протизапальним механізмам дії поліфенолів, які є ключовими для підтримання гомеостазу шкіри та профілактики запальних і дегенеративних процесів.

Антиоксидантна дія поліфенолів ґрунтується насамперед на їх здатності інактивувати активні форми кисню та азоту шляхом донорства електронів або атомів водню. Фенольні гідроксильні групи стабілізують вільні радикали, перериваючи ланцюгові реакції пероксидного окиснення ліпідів клітинних мембран. Даний механізм є особливо важливим для шкіри, яка постійно зазнає впливу ультрафіолетового випромінювання та забруднювальних факторів довкілля.

Окрім прямого радикал-поглинаючого ефекту, поліфеноли здатні модулювати активність антиоксидантних ферментів, таких як супероксиддисмутаза, каталаза та глутатіонпероксидаза. Доведено, що ресвератрол і рутин стимулюють ендогенні антиоксидантні системи клітин, знижуючи рівень оксидативного стресу та уповільнюючи процеси фотостаріння шкіри.

---

[10] Pandey K. B., Rizvi S. I. Plant polyphenols as dietary antioxidants in human health and disease. *Oxidative Medicine and Cellular Longevity.* 2009. Article ID 897484. DOI: 10.4161/oxim.2.5.9498

[11] Guedes B. N., Andreani T., Oliveira M. B. P. P., Fathi F., Souto E. B. Eco-Friendly Hydrogels Loading Polyphenols-Composed Biomimetic Micelles for Topical Administration of Resveratrol and Rutin. *Biomimetics*. 2025. Vol. 10 (1). P. 8. DOI: https://doi.org/10.3390/biomimetics10010008

Антисептична дія поліфенольних сполук пов'язана з їх здатністю впливати на клітинні мембрани мікроорганізмів, порушуючи їх проникність та інгібуючи активність ферментів, необхідних для росту та реплікації. Флавоноїди та фенольні кислоти демонструють бактеріостатичну і бактерицидну активність щодо грампозитивних і грамнегативних бактерій, а також протигрибкову дію. Це робить поліфеноли перспективними компонентами топічних засобів для догляду за проблемною та запальною шкірою.

Протизапальні властивості поліфенолів реалізуються через інгібування ключових сигнальних шляхів запалення, зокрема NF-κB та MAPK. Поліфенольні сполуки здатні знижувати експресію прозапальних цитокінів, таких як інтерлейкін-1β, інтерлейкін-6 та фактор некрозу пухлин α, що сприяє зменшенню локального запалення. В експериментальних моделях було показано, що рутин та ресвератрол ефективно зменшують набряк і почервоніння тканин при місцевому застосуванні.

Важливою перевагою поліфенолів є їх комплексний механізм дії, що поєднує антиоксидантний, антисептичний і протизапальний ефекти. Така багатофункціональність дозволяє розглядати поліфеноли як альтернативу синтетичним активним речовинам, які часто викликають подразнення або побічні реакції при тривалому застосуванні.

Разом із тим ефективність поліфенолів значною мірою залежить від їх стабільності та біодоступності. При прямому нанесенні на шкіру активні сполуки можуть швидко деградувати під впливом світла, кисню та ферментів[12]. Саме тому включення поліфенолів у гідрогелеві системи розглядається як перспективний підхід до підвищення їх терапевтичної ефективності та пролонгації дії.

4. Перспективи використання поліфенолів у складі гідрогелевих систем для біомедичних і дерматологічних застосувань

Сучасні тенденції розвитку біомедичних матеріалів спрямовані на створення функціональних систем локальної дії, які поєднують біосумісність, контрольоване вивільнення активних речовин та мінімізацію побічних ефектів. У цьому контексті гідрогелеві системи з інкапсульованими поліфенолами розглядаються як перспективна платформа для топічного застосування у дерматології, косметології та регенеративній медицині.

[12] Tian R., Wen Y., Zhang Z. et al. Recent advances in smart hydrogels derived from polysaccharides andtheir applications for wound dressing and healing. DOI: 10.1016/j.biomaterials.2025.123134

Гідрогелі завдяки своїй тривимірній полімерній сітці здатні утримувати значну кількість води, що забезпечує комфорт при нанесенні, зволоження тканин та сприятливе мікросередовище для відновлення шкіри. Поєднання гідрогелевої матриці з поліфенольними сполуками дозволяє не лише захистити біоактивні молекули від деградації, але й забезпечити їх пролонговане та контрольоване вивільнення.

Особливу увагу в сучасних дослідженнях приділяють використанню природних та біорозкладних полімерів, зокрема альгінатів, хітозану, гіалуронової кислоти та желатину. Такі матеріали демонструють високу біосумісність і здатність до взаємодії з біологічними тканинами, що є критично важливим для дерматологічних аплікацій. Включення поліфенолів у подібні системи сприяє посиленню їх антиоксидантних та протизапальних властивостей[13].

У дерматологічній практиці гідрогелеві патчі з поліфенолами розглядаються як ефективні засоби для догляду за шкірою, схильною до запалення, гіперпігментації та фотостаріння. Ресвератрол, рутин, кверцетин та катехіни здатні зменшувати оксидативний стрес, покращувати мікроциркуляцію та сприяти відновленню бар'єрної функції епідермісу.

Перспективним напрямом є також використання біоміметичних систем доставки, зокрема мікел та наноструктурованих носіїв, інтегрованих у гідрогелеву матрицю. Такі комбіновані системи дозволяють підвищити стабільність поліфенолів, оптимізувати їх розподіл у гідрогелі та забезпечити таргетоване вивільнення активних компонентів. Даний підхід відкриває нові можливості для створення високоефективних топічних форм з прогнозованими фармакокінетичними характеристиками.

Водночас залишається низка наукових і технологічних викликів, пов'язаних зі стандартизацією складу гідрогелевих систем, відтворюваністю їх фізико-хімічних властивостей та масштабуванням виробництва. Особливої уваги потребує питання збереження біологічної активності поліфенолів у процесі формування гідрогелів та при тривалому зберіганні готових продуктів.

Останні дослідження свідчать про стрімкий розвиток адаптивних і багатофункціональних гідрогелевих систем, призначених для біомедичних і дерматологічних застосувань. Особливу увагу приділяють гідрогелям, функціоналізованим антиоксидантами та природними поліфенольними сполуками, які забезпечують поєднання

[13] Savka M. Z., Babin Ya. O., Kohut H. P. pH-sensitive hydrogels based on sodium alginate and chitosan. *Chemistry, Technology and Application of Substances*. 2017. Vol. 63. P. 63–70.

протизапальної, антисептичної та регенеративної дії. Показано, що інтеграція поліфенолів у біоміметичні та стимулочутливі гідрогелеві матриці сприяє підвищенню стабільності біоактивних компонентів, оптимізації їх контрольованого вивільнення та покращенню процесів загоєння тканин[14].

Таким чином, результати сучасних досліджень свідчать про значний потенціал використання поліфенолів у складі гідрогелевих систем для біомедичних і дерматологічних застосувань. Комплексне поєднання біосумісних полімерів та природних біоактивних сполук створює наукове підґрунтя для розробки інноваційних гідрогелевих патчів з покращеними функціональними властивостями, що обґрунтовує доцільність подальших теоретичних і експериментальних досліджень у даному напрямі[15].

ВИСНОВКИ

Проведений аналіз сучасних наукових джерел дозволяє зробити висновок, що гідрогелеві системи є однією з найбільш перспективних платформ для локальної доставки біоактивних сполук у біомедичних і дерматологічни застосуваннях. Їх тривимірна полімерна структура, висока водоутримувальна здатність та можливість модифікації фізико-хімічних властивостей забезпечують оптимальні умови для пролонгованого вивільнення активних речовин і взаємодії з біологічними тканинами.

У результаті аналізу сучасних тенденцій створення біоактивних гідрогелів встановлено, що основний науковий інтерес зосереджений на використанні біополімерів природного походження, зокрема альгінатів, хітозану, гіалуронової кислоти, желатину та бактеріальної целюлози. Зазначені матеріали характеризуються високою біосумісністю, низькою токсичністю та здатністю до формування стабільних гідрогелевих матриць з керованими механічними й реологічними властивостями.

Аналіз літературних даних щодо природних поліфенольних сполук показав, що вони є однією з найбільш біологічно активних груп вторинних метаболітів рослинного походження. Поліфеноли проявляють виражену антиоксидантну, протизапальну та антисептичну активність,

[14] Yuhui Li, Guoyou Huang, Xiaohui Zhang, Baoqiang Li, Yongmei Chen, TingliLu, Tian Jian Lu, Feng Xu. Magnetic hydrogels and their potential biomedical applications. *Adv Funct Mater.* 2013. Vol. 23 (6). P. 660–672. DOI: https://doi.org/10.1002/adfm.201201708

[15] WangW., DaiJ., HuangY., LiX., Yang J., Zheng Y., Shi X. Extracellular matrix mimicking dynamic interpenetrating network hydrogel for skin tissue engineering. *Chem. Eng. J.* 2023. Vol. 457, Article 141362. DOI: https://doi.org/10.1016/j.cej.2023.141362

що обумовлює їх широкий потенціал у дерматології, косметології та регенеративній медицині. Водночас їх практичне застосування обмежується низькою стабільністю, чутливістю до окиснення та обмеженою біодоступністю.

У розділі показано, що інкорпорація поліфенолів у гідрогелеві системи дозволяє суттєво мінімізувати зазначені обмеження. Гідрогелева матриця виконує захисну функцію, стабілізуючи біоактивні молекули та забезпечуючи їх контрольоване вивільнення у зоні аплікації. Особливо перспективними є комбіновані системи, у яких поліфеноли попередньо інкапсулюються у мікелярні або наноструктуровані носії з подальшою інтеграцією у гідрогель.

Проаналізовані механізми антисептичної, антиоксидантної та протизапальної дії поліфенолів свідчать про їх комплексний вплив на клітинному та молекулярному рівнях, зокрема через нейтралізацію вільних радикалів, модуляцію запальних сигнальних шляхів і пригнічення росту патогенних мікроорганізмів. Це підтверджує доцільність використання поліфенольних сполук у складі гідрогелевих систем для догляду за шкірою та лікування поверхневих уражень.

Таким чином, літературний огляд підтверджує наукову та практичну обґрунтованість поєднання гідрогелевих матриць і поліфенолів у складі біоактивних систем локальної дії. Отримані узагальнення створюють теоретичне підґрунтя для подальших експериментальних досліджень, спрямованих на розробку та оптимізацію гідрогелевих систем з поліфенолами, що і визначає актуальність та логіку подальших етапів дисертаційної роботи.

АНОТАЦІЯ

У розділі узагальнено сучасні теоретичні підходи до створення гідрогелевих систем з поліфенолами як перспективних біоактивних матеріалів для біомедичних і дерматологічних застосувань. Проаналізовано основні тенденції розвитку гідрогелів на основі природних та синтетичних полімерів, що забезпечують біосумісність, контрольоване вивільнення активних речовин і адаптивні фізико-хімічні властивості. Розглянуто класифікацію поліфенольних сполук, їх фізико-хімічні характеристики, біологічну активність та сучасні методи одержання з рослинної сировини. Особливу увагу приділено механізмам антиоксидантної, антисептичної та протизапальної дії поліфенолів, що зумовлюють їх високу ефективність у складі гідрогелевих носіїв. Проаналізовано наукові дані європейських, американських та українських досліджень щодо інкапсуляції поліфенолів у гідрогелеві матриці.

Показано переваги використання гідрогелевих систем для підвищення стабільності та біодоступності поліфенольних сполук. Обґрунтовано перспективність застосування таких систем у косметології, дерматології та регенеративній медицині. Отримані узагальнення створюють теоретичну основу для подальших експериментальних досліджень.

Література

1. Ahmed E. M. Hydrogel: Preparation, characterization, and applications: A review. *Journal of Advanced Research.* 2015. Vol. 6, No. 2. P. 105–121. DOI: https://doi.org/10.1016/j.jare.2013.07.006
2. Caló E., Khutoryanskiy V. V. Biomedical applications of hydrogels: A review of patents and commercial products. *European Polymer Journal.* 2015. Vol. 65. P. 252–267. DOI: https://doi.org/10.1016/j.eurpolymj.2014.11.024
3. Peppas N. A., Hilt J. Z., Khademhosseini A., Langer R. Hydrogels in biology and medicine: From molecular principles to bionanotechnology. *Advanced Materials.* 2006. Vol. 18, No. 11. P. 1345–1360. DOI: https://doi.org/10.1002/adma.200501612
4. Hoffman A. S. Hydrogels for biomedical applications. *Advanced Drug Delivery Reviews*. 2012. Vol. 64. P. 18–23. DOI: https://doi.org/10.1016/j.addr.2012.09.010
5. Sannino A., Madaghiele M., Demitri C. Development and characterization of cellulose-based hydrogels for biomedical applications. *Journal of Applied Polymer Science.* 2009. Vol. 114, No. 6. P. 3662–3669. DOI: https://doi.org/10.1002/app.30956
6. Savka M. Z., Babin Ya. O., Kohut H. P. pH-sensitive hydrogels based on sodium alginate and chitosan. *Chemistry, Technology and Application of Substances*. 2017. Vol. 63. P. 63–70.
7. Manach C., Scalbert A., Morand C., Rémésy C., Jiménez L. Polyphenols: food sources and bioavailability. *The American Journal of Clinical Nutrition.* 2004. Vol. 79, No. 5. P. 727–747. DOI: https://doi.org/10.1093/ajcn/79.5.727
8. Pérez-Jiménez J., Neveu V., Vos F., Scalbert A. Identification of the 100 richest dietary sources of polyphenols. *European Journal of Clinical Nutrition.* 2010. Vol. 64 (Suppl. 3). P. S112–S120. DOI: https://doi.org/10.1038/ejcn.2010.221
9. Middleton E., Kandaswami C., Theoharides T. C. The effects of plant flavonoids on mammalian cells. *Pharmacological Reviews.* 2000. Vol. 52, No. 4. P. 673–751.
10. Pandey K. B., Rizvi S. I. Plant polyphenols as dietary antioxidants in human health and disease. *Oxidative Medicine and Cellular Longevity.* 2009. Article ID 897484. DOI: 10.4161/oxim.2.5.9498

11. Guedes B. N., Andreani T., Oliveira M. B. P. P., Fathi F., Souto E. B. Eco-Friendly Hydrogels Loading Polyphenols-Composed Biomimetic Micelles for Topical Administration of Resveratrol and Rutin. *Biomimetics*. 2025. Vol. 10 (1). P. 8. DOI: https://doi.org/10.3390/biomimetics10010008

12. Tian R., Wen Y., Zhang Z. et al. Recent advances in smart hydrogels derived from polysaccharides andtheir applications for wound dressing and healing. DOI: 10.1016/j.biomaterials.2025.123134

13. Yuhui Li, Guoyou Huang, Xiaohui Zhang, Baoqiang Li, Yongmei Chen, Tingli Lu, Tian Jian Lu, Feng Xu. Magnetic hydrogels and their potential biomedical applications. *Adv Funct Mater*. 2013. № 23 (6). P. 660–672. DOI: https://doi.org/10.1002/adfm.201201708

14. Wang W., Dai J., Huang Y., Li X., Yang J., Zheng Y., Shi X.. Extracellular matrix mimicking dynamic interpenetrating network hydrogel for skin tissue engineering. *Chem. Eng. J.* 2023. № 457. Article 141362. DOI: https://doi.org/10.1016/j.cej.2023.141362

15. Sen C. K. Human wounds and its burden: an updated compendium of estimates. *Adv. Wound Care.* 2019. № 8 (2). P. 39–48. DOI: https://doi.org/10.1089/wound.2019.0946

16. Norahan M. H., Pedroza-González S. C., Sánchez-Salazar M. G., Álvarez M. M., de Santiago G. T. Structural and biological engineering of 3D hydrogels for wound healing. *Bioact. Mater*. 2023. 24. P. 197–235. DOI: https://doi.org/10.1016/j.bioactmat.2022.11.019

17. Shao Z., Yin T., Jiang J., He Y., Xiang T., Zhou S. Wound microenvironment self-adaptive hydrogel with efficient angiogenesis for promoting diabetic wound healing. *Bioact. Mater.* 2023. Vol. 20. P. 561–573. DOI: https://doi.org/10.1016/j.bioactmat.2022.06.018

18. Fang Y., Nie T., Li G., Wang L., Du J., Wu J. Multifunctional antibiotic hydrogel doped with antioxidative lycopene-based liposome for accelerative diabetic wound healing. *Chem. Eng. J.* 2024. № 480. Article 147930. DOI: https://doi.org/10.1016/j.cej.2023.147930

Information about the author:
Duk Nazarii Mykhailovych,
Postgraduate Student in Biotechnology and Bioengineering (G21),
Department of Biotechnology and Bioengineering,
Lviv Polytechnic National University
12, Stepan Bandera street, Lviv, 79000, Ukraine

CHAPTER 15

GENETICALLY MODIFIED ORGANISMS IN FOOD IMPACT ON THE ECOSYSTEM

Kichura D. B., Sobechko I. B.
DOI https://doi.org/10.30525/978-9934-26-654-6-15

INTRODUCTION

Genetic engineering allows providing the world's population with a new type of food ("new food"). This is the main argument of supporters of the spread of transgenes in pharmacology, agriculture, the food industry, horticulture, and nature conservation. Among the food products registered as GMOs, agricultural plants predominate: soybeans (54 %), corn (28 %), cotton and rapeseed (9 % each), and potatoes (1 %). Transgenic products do not spoil for a long time and do not change their appearance. Analyzing information sources, we are convinced that genetic modifications of all food products achieve the following goals: 1) Changing the consumer properties of products. The goal is developing very slowly, and is being industrially spread. For example, rice enriched with vitamin A and minerals has been obtained; tomatoes with a high proportion of iron; rapeseed with a changed composition of fatty acids; soybeans with a high content of phytosterols (to reduce cholesterol). 2) Rational, efficient, and cheap production of food products. 3) Increasing yield. The goal is achieved by introducing genes resistant to: pests; climatic conditions; pesticides; viruses. Considerable attention and resources are paid to such genetic modifications, as they form the basis of modern GMOs. The main problems associated with the study of GM food products are the following: firstly, gaps in the domestic legislative and regulatory framework; secondly, the lack of a control system for products labeled "with GMO" and incorrect labeling "WITHOUT GMO" (for example, table salt, mineral water, sanitary napkins, etc.). For comparison, in Canada and the USA, product labeling: "WITHOUT GMO" – is voluntary, in EU countries all products with GMOs over 0.9 % – are necessarily labeled. In Ukraine, food products labeled "WITH GMO" mean: a) the proportion of GMOs exceeds 0.9 % in any ingredient of the food product; b) the product consists of or is produced on the basis of genetically modified organisms

In European countries and some CIS countries, the legislation provides for the following options for labeling food products: "Own GMO", "Products

containing GMOs", "Products with GMOs", "Finished food products containing GM raw materials", "Food products containing food additives or flavorings obtained from GM plants or GM microorganisms". However, on packages with products from domestic manufacturers we see only the mark: "Without GMOs".

The third problem is the high cost of equipment and expensive materials (test systems) for the identification and quantitative determination of GMOs in a single product. Therefore, today the number of laboratories accredited for the determination of GMOs is quite limited. Mostly, these are state laboratories that are part of the State Service for Food Safety and Consumer Protection. Products are identified for the presence of GMOs by laboratory tests, using special equipment in laboratories accredited for compliance with the requirements of DSTU ISO/IEC 17025:2006.

In Ukraine, the following laboratories are accredited for the identification of GMOs in food products: the National University of Life Resources and Environmental Management of Ukraine; the testing center of the State Enterprise "Institute of Eco-Hygiene and Toxicology named after L. I. Medved"; the central testing laboratory for the quality control of goods of the State Enterprise "Ukrmetrteststandart"; the center for diagnostics of viruses and transgenes of seeds and plants; SE "Kyivoblstandartmetrologiya" and regional laboratories of SE "Standard Metrology" cities: Ternopil, Vinnytsia, Cherkasy, Zaporizhia, Donetsk, etc.; regional state laboratories of veterinary medicine: Ivano-Frankivsk, Lviv, Khmelnytskyi, etc. In Lviv, GMOs are determined by the Lviv Regional State Laboratory of Veterinary Medicine; State Control Research Institute of Veterinary Drugs and Feed Additives; PE "Biola".

The fourth problem, lobbying interests and the monopoly position of the German company "R-BiopHarm AG" – a manufacturer of test systems for GMO diagnostics. Test systems are developed by the following companies: SE "Ukrmetrteststandart" (Ukraine); "R-BiopHarm AG" (Germany). Well-established logistics for the sale of drugs in Germany and around the world, SureFood test system kits are distributed by R-Biopharm. Test systems are manufactured by the German company Congen Biotechnologie, which is located in Berlin.

The fifth problem is that the EU and Ukraine have not yet developed methods for detecting non-additive, enhancing or attenuating effects when assessing the degree of risk of GMOs to human health. For example, it is scientifically proven that the same trans gene, depending on its location in the genome (chain) of DNA, the stage of GMO development, and the season, exhibits different activity – unpredictable and uncontrolled. This

affects metabolic pathways and properties of final products. For example, lignification of cell walls was observed in Bt-soybean (herbicide-resistant) and Bt-corn (pest-resistant). Therefore, the development of new methods for risk analysis based on a synergistic model (which takes into account the interaction of the transgene at all levels) is relevant for geneticists. The sixth problem is the impact of gene technologies on ecology and the environment. The spread of GMOs and the use of modified DNA leads to uncontrolled interactions.

The main ways in which GMOs enter the environment are:

1) Disposal of intact GMOs and DNA on production equipment and in laboratories through sewage.

2) Spread in a free state due to the cultivation of GMO plants on experimental agricultural plots of land. In this case, trans genes are spread through: pollen, which affects the crossing of plants (horizontal gene transfer); assimilation of DNA from the remains of dead Bt plants by soil bacteria (vertical gene transfer); the negative effect of new GM microorganisms with different properties on insects in the ecosystem chain; an unpredicted change in the properties of GMOs as a result of the interaction of the new gene and the organism.

1. Why do we use GMOs?

Increased concern about food security at the national and international levels is primarily due to the expansion of the spectrum of harmful effects that are generated as a result of the deterioration of the environmental situation, the creation of modified types of food raw materials, the use of a wide range of pesticides and toxic chemicals to combat weeds, pests and diseases on crops, the use of hormonal drugs for growing animals, poultry and fish, as well as the use of a wide range of stabilizers, flavors, dyes and other chemicals for the manufacture of food products. This has given rise to a number of problems in various spheres of life of the countries of the world community, the solution of which will be very difficult to solve without proper financial support. First of all, we must understand the simple truth: “The quality and safety of a healthy food product is laid in the agroecosystem”, and therefore its creation must be considered in a single scheme: environmentally friendly farming (technological aspect) – harvesting – storage – production of an environmentally friendly product – trade network – consumer. Violation of a single production cycle at any stage can lead to a deterioration in the quality and safety of both food raw materials and finished products of food industries in general. On the other hand, we should not forget that the need for food products due to demographic changes in the countries of the world

community will have an increasingly urgent importance. Since ancient historical eras, the world's population has been growing rapidly: in 1830. the human population grew to 1 billion people, already in 1930 its number was 2 billion, in 1960 – 3 billion, in 1975 – 4 billion, in 1999 – 6 billion, and by the middle of the 21st century the population may reach more than 7 billion people. In this regard, it is obvious that the rate of production of genetically modified food products will increase. According to supporters of genetic engineering technologies, the need to grow GM crops is dictated by the following factors: – the growth of the population on planet Earth, which will suffer from hunger, will double in 2050 and will amount to 1.8 billion; increasing demand for biofuels;- reduction of agricultural land by 19.4 million hectares. Genetic engineering is a relatively young science that is designed to create and improve the characteristics of living organisms by transplanting foreign genetic material into them, for example, fish DNA into a tomato (so that it does not freeze) or bacteria into a potato (so that a beetle does not eat the plant). Genetic engineering is fundamentally different from breeding in that its methods allow overcoming barriers between species, which does not happen in nature. The first genetically modified plants appeared in 1983, and large-scale industrial production of GM crops in the world began in 1996 – at that time they occupied 1.7 million hectares. The area under agricultural crops of genetically modified origin in 2016 reached 185.1 million hectares against 179.7 million hectares in 2015 – reports the International Service for the Acquisition of Agribiotech Applications (ISAAA). Currently, GM crops are grown in 26 countries. By the way, the range of genetically modified crops today is quite wide, including: peas, potatoes, corn, rapeseed, rice, sunflower, soybeans, cotton, sugar beets, flax, chicory, tomatoes, eggplants, peppers, carrots, peppers, etc. The largest number of them is in the USA (72.9 million hectares, which is 39 % of the total area) – about 90 % of all GM crops registered in the world are allowed to be grown here; in Brazil (49.1 million hectares, or 27 %) the largest areas are occupied by crops such as soybeans, corn and cotton; in Argentina (24.4 million hectares, or 12 %) – soybeans, corn and cotton; in Canada (11.6 million hectares, or 6 %) – potatoes; in India (10.8 million hectares, or 6 %) – cotton, in Paraguay (3.6 million hectares, or 2 %) – soybeans; in China (2.8 million hectares, or 2 %). – cotton. At the same time, plants with herbicide resistance genes are grown on approximately 53 % of the area (especially to systemic herbicides – ammonium glyphosate group), combined type with several traits – on 33 % of the area and pest resistance – on 18 %. It should be noted that EU countries are more reserved about the rapid introduction of biotechnological crops into their production.

Thus, in 2016, GM corn MON810 (the only one permitted for cultivation in the EU) was grown by only four countries (Spain, Portugal, the Czech Republic and Slovakia). Germany practically abandoned the cultivation of GM potatoes, and the Czech Republic and Slovakia stopped growing GM corn in 2017. Portugal and Spain also sharply reduced the area sown with GM crops. At the same time, GM crops continue to be imported into the EU for further use as animal feed. In particular, Roundup Ready soybeans are imported. There are imported transgenic rice, sunflower and rapeseed oil on the market. Supporters of GMOs cite a number of advantages of GM organisms: high yield and quality of agricultural crops, increased frost and drought resistance of such crops, the ability to resist many types of weeds, diseases and pests. Instead, a wide range of scientists cite research data confirming the negative impact of GMOs on both humans and the environment as a whole. These include: the occurrence of allergic reactions; suppression of the human immune system, possible metabolic disorders; increased toxicity in food products, destruction of natural ecosystems and disruption of the ecological balance during mass open cultivation of transgenic plants. The international service, which annually publishes a global review of the commercialization of biotechnological crops (ISAAA, 2014), identifies the following most characteristic features of GM corn lines: resistance to various herbicides, resistance to lepidopteran and coleopteran insects, resistance to antibiotics, male cytoplasmic sterility in plants, drought resistance, altered alpha amylase and amino acid composition of grain. Of course, the list of possible risks and dangers from the use of GMOs has not yet been fully disclosed. It should be noted that research in this field of knowledge is quite questionable today, as a rule, they are highly specialized. For example, agricultural scientists associate GM plants mainly with technology, food industry technologists with quality, and scientists in the field of genetics with modifications in the organisms themselves. At the same time, in our opinion, such research should be given a comprehensive direction. An approximate scheme for conducting such research is presented in the figure. What does the situation look like with the production of genetically modified products in Ukraine? Officially, no type of genetically modified plants is grown in Ukraine. But today, genetically modified (GM) food products are not uncommon and the range of their application in the food industry is quite wide. Genetically modified soybeans, potatoes, corn, zucchini, tomatoes, rice, sugar beets, melons, etc. have found widespread use in the food industry, some of them are also grown in the fields of agricultural formations in Ukraine. Some experts believe that about one million hectares of Ukrainian land are occupied by GM crops, of which more than 50 % are soybeans, 20 % are corn, and the rest are potatoes, sugar

beets, and rapeseed. Therefore, there is a high probability of encountering GMOs in food products made from the above-mentioned plants[1, 2].

To more deeply clarify the situation regarding the production, circulation and consumption of food products produced with the participation of GM crops, we conducted a sociological survey of two categories of the population: producers and consumers of these products. In particular, among the surveyed respondents, the majority believes that the situation regarding the production, use and circulation of GMOs in food technologies at the legislative level is insufficiently regulated – 31.9 %, another 29.9 % – rather partially, 8.5 % – do not pay due attention to this issue, 27 % – are unaware and only 10.6 % believe that this issue is fully regulated. The majority of respondents (55.3 %) expressed their opinion on the need to test products for GMO content at the stage of production, import and export and other areas of circulation, 19.1 % – selectively at different stages of circulation, 10.6 % – at the stage of import and export, 6.5 % – rather partially and only 8.5 % – inappropriate. At the same time, a significant part of the respondents (76.7 %) noted that it is advisable to introduce an effective system of tracking and labeling of food products containing GMOs at the level of the Law, 17 % – believe that such tracking is advisable for individual products, 4.2 % – on a voluntary basis and only 2 % – inappropriate.

In addition, a significant part of the population has reservations about the safety of food products containing GMOs for human health (22 %), another 35.3 % – partially and 36.7 % said that food products created with GMOs are safe. The opinion of the surveyed respondents regarding whether they have enough information about the sale of food products containing GMOs in retail establishments is also noteworthy. In this context, the answers were distributed as follows: 56 % of the respondents said that they were aware, 19.2 % – rather partially, 13.2 % – not enough, 7.2 % – do not pay due attention to this issue and 4.4 % – emphasized that they are not aware at all. Regarding the answer to the question about the effectiveness of advertising in Ukraine about the dangers of GMOs in food, the answers of the respondents were distributed as follows: only 10.4 % of respondents believe that such advertising exists and is quite effective, another 11.8 % – rather partially, but 58.8 % noted that there is no such advertising at all, at the same time 11.8 % do not pay attention to this issue at all and 7.2 % of respondents are unaware. At the same time, a certain part of the respondents indicates that in

[1] Юлевич О. І. Біотехнологія : навчальний посібник / О. І. Юлевич, С. І. Ковтун, М. І. Гиль ; за ред. М. І. Гиль. Миколаїв : МДАУ, 2012. 476 с.

[2] Теплоухов Б. П. Зброя масового знищення та захист від неї. Київ : Скіф, 2023. 100 с.

Ukraine more attention should be paid to the production of organic products, to conduct extensive explanatory work among the population regarding the harmfulness of GMOs, or to ban their production and circulation altogether. Therefore, the question arises, should Ukraine legalize or not legalize the production of genetically modified products? If we objectively assess the situation, it is obvious that it is worth abandoning the production and consumption of genetically modified products for several good reasons: the lack of in-depth research in Ukraine on the usefulness or harmfulness of food products created with the participation of GMOs; the deterioration of the population's health; a fairly high level of agricultural production, which has made Ukraine one of the largest exporters of plant raw materials. Possessing a huge agricultural potential, among such developed countries of the world as the USA, Canada, Great Britain, France, Germany, Italy and Poland, Ukraine occupies key positions in the production of agricultural products per person (2015): grain and leguminous crops – 1403 kg, sunflower – 261 kg, potatoes – 486 kg, sugar beet – 241 kg, vegetables – 215 kg and eggs – 392 pieces. However, the indicators for milk and meat production have significantly decreased compared to previous years, of which 248 and 54 kg were produced, respectively. At the same time, in terms of food consumption, Ukraine lags behind a number of developed countries of the world, especially in terms of the range and quality of food products. Taking into account the above arguments, it is more expedient in Ukraine to develop organic farming, which is one of the methods of producing ecological products, which is gaining increasing popularity in the countries of the world community. Organic farming is a system of crop and livestock farming that refuses or significantly limits the use of chemical agents, primarily pesticides, artificial mineral fertilizers, growth regulators and food additives for the preparation of feed for cattle, pigs, poultry, fish, etc. This system is based on scientifically based crop rotations, the use of organic fertilizers, soil-protective tillage, agrotechnical and biological means of protecting cultivated plants from pests, diseases and weeds in order to form a stable crop yield with high quality indicators of crop products. In this context, permaculture deserves special attention, which is actively implemented in private farms. This direction is especially worthy of attention for the development.

2. The GMO problem and risks

The GMO problem and the risks of using transgenic plants for human health have not yet been finally proven. There is no consensus among world scientists on the negative impact of GMOs. Some believe that GMOs are safe, others that transgenic plants cause allergic reactions, cancer, gastrointestinal

disorders, etc. Recently, the EU has been paying more and more attention to assessing the risk of using GMOs in the human food chain. In 2014, studies were conducted with the participation of the European organization EFSA, aimed at assessing the risk of GMOs to the human body. The studies were conducted in 6 European countries for three months. For this, 50 g of corn in the form of pastries and flakes, which contains GMOs in an amount of 5.07 mg/kg, was introduced into the daily diet of people of different age groups (from 3 months of age to 75 years). The results of the studies showed that with daily consumption of GM corn in the diet by people of different age groups during the specified period, a chronic 16 risk develops. What could this indicate? If people who did not suffer from allergic reactions before consuming GM corn, then they may be at risk of developing allergies in the future. What is the situation in Ukraine regarding GMOs? Today, according to the Law of Ukraine "On the State Biosafety System in the Creation, Testing, Transportation and Use of Genetically Modified Organisms", the industrial production and introduction into circulation of GMOs, as well as products produced with the use of GMOs, is prohibited until their state registration. However, despite the ban, GM feed, raw materials and products have begun to appear on the Ukrainian market. Given this fact, there is a need to create and monitor raw materials, feed and food products for the presence of GMOs. The aim of the work was to analyze the results of research on grains and feed for the period 2016–2017 on the presence of GMOs and the spread of GM lines in Ukraine. Materials and methods. The research was conducted during 2016–2017 using the real-time polymerase chain reaction (PCR-RF) method on the basis of the research department for GMO detection of the State Research Institute for Laboratory Diagnostics and Veterinary and Sanitary Expertise (DNILDVSE), Regional State Laboratories of the State Service for Food, Agriculture and Food Safety (RDL), branches of DNILDVSE and other laboratories. Diagnostic kits for screening, identification of GM lines and determination of their quantitative content (R-Biophapm AG, Germany) were used for the research: SureFood GMO Screen 35S+NOS+FMV, SureFood GMO Screen 4plex BAR/NPTII/PAT/CTP2:CP4 EPSPS, SureFood GMO ID RR Soya, SureFood GMO ID RR2Y Soya, SureFood GMO QUANT RR-Soya, SureFood GMO QUANT GT73 Canola. Reference standards of different percentage concentrations of soybean, corn, and rapeseed (ERM, Belgium) were used as positive controls. Biorad CFX96 amplifier. Research results. Today, the State Service for Food and Consumer Protection has 9 fully functioning accredited laboratories that conduct GMO analysis: DNDILDFSE, Kharkiv branch of DNDILDFSE, Poltava, Cherkasy, Dnipropetrovsk, Khmelnytskyi, Lviv, Kirovohrad, Ivano-Frankivsk regional

state laboratories. During 2016, 2,599 samples of plant raw materials were examined, of which GM lines of soybean and rapeseed were detected in 177 samples. In 2017, 4,371 were examined, of which 329 samples were positive. In positive samples of compound feed, soybeans, oilcake and soybean meal, GM lines MON 40-3-2 and MON 89788 were identified in an amount of more than 10 %, in samples of rapeseed and rapeseed oilcake, GM line GT-73 was detected in an amount of more than 10 %[3].

The main reason for controlling the circulation of GMOs is to provide the consumer with the right to choose when consuming food products containing components of GM plants. In Ukraine, the main regulatory document regulating the circulation of GMOs in Ukraine is the Law of Ukraine No. 1103 dated May 31, 2007 "On the State Biosafety System for the Creation, Testing, Transportation and Use of Genetically Modified Organisms", adopted with the aim of implementing the basic principles of the Cartagena Protocol on Biosafety into the legislation of Ukraine. However, as practice shows, an effective mechanism for regulating GMOs, especially in terms of their registration, is actually absent. Despite the existence of four State Registers, currently in Ukraine there is only one product registered and permitted in the production of feed for farm animals, namely "soybean meal of the GMO line MON 40-3-2". However, as the results of research by our and other laboratories show, other GMOs are also present in circulation on the agricultural market of our country.

3. GMOs as medicines

In recent decades, biotechnology has been rapidly developing in the pharmaceutical industry. With their help, fundamentally new drugs (drugs) (cytokines, hormones, blood clotting factors, vaccines, monoclonal antibodies, etc.) are created, which more effectively and selectively affect pathological processes. The use of drugs of biotechnological origin (BTP) is revolutionary in the treatment of viral diseases and such severe chronic diseases as diabetes mellitus, rheumatoid arthritis, oncological diseases, anemia in chronic kidney disease, tuberculosis, etc. BTP drugs are produced, in particular, by genetic engineering (or recombinant DNA technology), which is based on the construction of DNA fragments in vitro with the subsequent introduction of new (recombinant) genetic structures into a living cell and their expression. The first to be synthesized using this technology were insulin, growth hormone, α- and β-interferons in 2004, recombinant epoetin-α, granulocyte colony-stimulating factor in 2006, and follicle-stimulating hormone

[3] Півень О. Без ГМО: правда і страшилки про генну інженерію. Київ : Віхола, 2022. 178 с.

in 2007. Among the drugs of BTT origin is recombinant Interferon alpha-2b, synthesized by Escherichia coli cells based on a gene encoding a product identical to human alpha-2b interferon, using phage-dependent genetic engineering biotechnology. The drug, like natural leukocyte interferon, has three main types of biological activity: immunomodulatory, antiviral, and antitumor. Filgrastim is a highly purified non-glycosylated protein consisting of 175 amino acids, and is also produced by Escherichia coli bacteria, into whose genome the human granulocyte colony-stimulating factor gene was introduced by genetic engineering. Human granulocyte colony-stimulating factor is a glycoprotein that regulates the formation of functionally active neutrophils and their release into the blood from the bone marrow. Among the drugs synthesized by cells of higher organisms is recombinant human erythropoietin (EPO), which contains 165 amino acids in which the human erythropoietin gene has been transfected. The product contains an amino acid sequence identical to natural erythropoietin. Erythropoietin is a glycoprotein that has a stimulating effect as a hormonal factor of mitosis and differentiation of erythroid precursor cells in the bone marrow. The first recombinant erythropoietin preparation (epoetin-α) was developed in the mid-1980s. Currently, several recombinant human EPO preparations have been obtained by genetic engineering for clinical medical use. In world medical practice, the most widely used are recombinant EPO-alpha and EPO-beta, which differ in the level of glycosylation. Their amino acid sequence is the same (165 amino acids). Alpha and beta EPO differ only in the number of carbohydrates, but have approximately the same biological activity. Purified commercial alpha and beta EPO are a mixture of isoforms from 9 to 14. The two products are synthesized in a culture of Chinese hamster ovary cells, into which the cDNA of the human EPO gene was inserted. Omega EPO is produced in a culture of kidney cells of young Chinese hamsters. Another EPO that has received approval from the European Medicines Agency is delta EPO, which is synthesized in a culture of human fibrosarcoma cells (HT – 1080 line). Among the most significant problems of quality, efficacy, safety and production of BTP drugs are: – the complexity of the structure of the active substance (peptides or proteins, glycoproteins, which consist of many macromolecules of complex structure); – the complexity of production and the presence in the technological chain of “capricious” microorganisms (viruses, bacteria, fungi), or animal cells (kidney fibroblasts (VNK line), ovaries (CHO line); – imperfection of quality control methods for this group of drugs; – lack of a long clinical history. The process of manufacturing BTP drugs can be divided into six main stages: – synthesis of cDNA of the active substance; – selection of a vector for transfection and its combination with

cDNA; – selection of producer cells and modification of their genome using the resulting vector-cDNA construct (transfection); growth of transfected producer cells and obtaining a supernatant containing the biotechnological product; – purification of the product using highly efficient biochemical methods; – creation of a dosage form (stabilization, packaging, standardization by dosage). Therefore, when studying the stability of drugs of BT origin, the term "purity" is quite conditional, since it is extremely difficult to determine the absolute purity of such products due to the effects of glycosylation, deamidation or other heterogeneities. Therefore, the purity of these drugs should generally be determined by more than one method, taking into account that the results obtained will largely depend on the analytical method used. Pharmacovigilance is a very important tool for collecting and evaluating data on the safety of biosimilars. Key activities in pharmacovigilance of BTP drugs are: risk identification, using knowledge of the reference drug, taking into account potential differences in safety profiles, and efferent drug and biosimilar. In this case, special attention should be paid to the detection and assessment of cases of immunogenicity, including lack of efficacy[4, 5].

4. GMOs – harm or benefit?

The growth of the population on the Earth and the emergence of factors that affect the reduction of crop yields are forcing humanity to look for ways to solve the global food problem. Today, one of these ways is to use scientific achievements in the field of genetic engineering. With the help of biotechnology, various "genetically modified organisms" (GMOs) are obtained, resistant to various pests, diseases, changes in the habitat, climate. Many scientists see genetic engineering as a way to solve the food problem in developing countries. Almost a third of food products in European countries are "genetically modified", in the USA this figure reaches 60 %. This term is understood as any living organism in which the natural set of genes has been artificially changed. As a result, new varieties of plants are created and grown that are resistant to environmental influences and that give high yields. In animal husbandry, animals that are characterized by accelerated growth are more productive. And yet, is the widespread use of genetically modified products dangerous for human health and the environment? Supporters of the use of genetic engineering in agriculture are sure that eating transgenic food poses no greater danger to humans than eating conventional products.

[4] Paul Knoepfler GMO Sapiens: The Life-Changing Science of Designer Babies. NY : WSPS, 2015. 282 p.

[5] Wunderlich S., Gatto K. A. Consumer Perception of Genetically Modified Organisms and Sources of Information. *Adv. Nutr*. 2015. Vol. 6. P. 842–851.

Their main arguments are as follows: genetically modified crops allow for the production of food products in larger quantities, cheaper and tastier than traditional crops; plants can be modified so that they contain more nutrients and vitamins; genetically modified plants can be adapted to 57 extreme conditions (drought, cold, etc.); the use of genetically modified crops that are resistant to pests will allow fields to be treated with pesticides less; food products containing genetically modified ingredients can become beneficial for health if vaccines against infectious diseases are added to them. The possible harm of genetically modified products was first announced in 2000. Then a statement by world scientists on the dangers of genetic engineering was published, and then their open letter to the governments of all countries on GMOs, signed by 828 scientists from 84 countries of the world. In December 2004, the European Union banned the sale of GMOs using antibiotic-resistant genes, and the World Health Organization (WHO) recommended that manufacturers refrain from using these genes. However, even large corporations do not fully comply with WHO recommendations. At an international conference dedicated to the topic of GMOs, experts from the All-Ukrainian Ecological League expressed the opinion that the unauthorized distribution of such products is a dangerous experiment on the population and soils of Ukraine. There is a category of supporters and individuals interested in exaggerating the potential danger of genetically modified organisms. First of all, these are molecular geneticists who support the horror story of possible GMO problems in order to obtain funding for scientific research, which, in fact, contributes to the development of the topic of genetic engineering. Religious motives for rejecting products created from modified organisms due to the disruption of the natural process of formation of a particular organism are quite understandable and acceptable. Giant corporations – manufacturers of herbicides, pesticides, insecticides, are also interested in lobbying the topic of GMOs in order to preserve their huge capacities, since they lose the market for their products if transgenic plants do not need it. But the most interested are manufacturers and importers of food additives and products with synthetic additives, who are most satisfied with the fact that due to the inflated problem of GMOs in the food industry, claims to less. As for GMO itself, as such, according to the followers of genetic engineering, any genetic information, modified or not, is encoded in the form of a sequence of nucleotides consisting of a nitrogenous base, pentose sugar and phosphoric acid, which are the absolute norm for all living things. Genetic modification itself is a change in the order of this sequence. However, in the process of preparing such a product for food, as well as in the process of digestion itself, this sequence is hydrolyzed, that is, it breaks down into its constituent

parts – nucleotides, which are naturally absorbed by the body. At the same time, the information of the modified genome does not pose any danger, since it disappears in the pan and stomach in the literal sense of the word. This is the same as preparing and eating a dish from a sheet of paper with some text, fearing that this information in the form of a certain sequence of letters of the alphabet may have harmful consequences. GMOs are a real breakthrough in providing food for the world's rapidly growing population. And this is the main argument of supporters of the spread of transgenes. There are many scientific works devoted to the issue of genetically modified organisms, but none of them directly answers the question of whether they are harmful or beneficial. In the near future It is unlikely that scientists will give a specific answer to the questions that the results of experiments in the field of genetic engineering entail, and first of all, this is because they did not set such a goal. After all, as always, there are two sides of the coin, that is, there are both opponents and supporters of GMOs, and each of them will try to prove their rightness and lobby their interests, using all possible and available means for them. Perhaps genetically modified organisms really carry harm due to combinations of genes that have never combined in nature. On the other hand, perhaps genetically modified products are another great discovery, which, like most sensational breakthroughs in science, has been unrecognized for a long time, and humanity has not yet realized its benefits. Opponents of GMOs cannot substantiate their fears at a more or less decent scientific level, since the number of correct scientific works that relate to the topic of GMO safety is quite limited. Scientists – biochemists, physiologists and molecular biologists from scientific communities around the world – argue that from a scientific point of view there is no difference between plants obtained using genetic engineering and plants bred by traditional breeding methods when cultivated in the fields and used in production, since the method of obtaining transgenic plants itself does not raise any concerns. That is why the problems of safety and use of GMOs should be resolved at the level of an individual product – using various tests that confirm the compliance of the studied products with existing standards and norms [6].

5. Distribution of genetically modified soybean in Ukraine

Soybean is a unique feed, food, technical and medicinal crop, the beans of which contain 35–45 % crude protein, 18–25 % fat, 22–35 % carbohydrates, enzymes, vitamins, minerals. Soy protein has a full set of amino acids

[6] Guidance on the EU menu Methodology / European Food Safety Authority. *EFSA Journal.* 2014. Vol. 12 (12) 3944. 77 pp. DOI: 10:2903/ j.efsa. 2014. 3944.

necessary for the human and animal body, which is easily digestible and is equal in biological value to the proteins of meat, milk, eggs. Soy protein, flour and oil can be found on the shelves of supermarkets in developed countries of the world as one of the components of more than 1000 food products – margarines, mayonnaise, meat substitutes, imitation dairy products, bread, bakery and confectionery products, chocolate, soy drinks, soy sauce and seasonings. In terms of soybean seed cultivation, Ukraine ranks first in Europe and is among the top ten countries in the world. Soybean is one of the most common biotech crops. The total area of its crops in the world is constantly growing and in 2016 amounted to 33.87 million hectares. Over 90 % of this area is occupied by genetically modified soybean with Roundup Ready herbicide resistance. Research results indicate the presence and cultivation of GM crops in Ukraine as well. Given the number of samples of agricultural crops containing GMOs, the constant growth of GM crop areas in the world and the geographical location of our country, the problem of the safety of using GM crops in food production arises. The aim of this study was to study the impact of traditional and genetically modified soybean on the postnatal development of rats of three generations. The experiment was conducted on 3 generations of Wistar rats: parental, first and second. The initial group was females and males, age 3-3.5 months. The animals were divided into three groups: control group – intact animals, group "Experimental 1" – animals that received a standard diet with 35 % of its protein content replaced by natural soybeans, group "Experimental 2" – animals that received a standard diet with a similar part replaced by transgenic soybeans "Roundup Ready" line GTS 40-3-2. The diets of all groups of animals met standard requirements and accepted norms. Before feeding, soybeans were heat treated to neutralize antinutrients and reduce urease activity. Intact animals received standard vivarium feed in compliance with the established diet. Animals of all groups consumed water ad libitum throughout the entire research period. Puppies were weaned from their mothers on the 30th day of life and transferred to the diet that the parental group received. To continue the experiment, offspring from different females were selected in order to randomize the studies and prevent incest. Intact and experimental animals were in identical conditions, the collection and processing of the material was carried out in parallel. The experiment was conducted in compliance with the requirements for experiments on animals (Strasbourg, 1985; Ukraine, 2001). A study of the development of first-generation rat pups showed that the average litter size in the "Experimental 2" group was 8.6 ± 1.5 heads, in the "Experimental 1" group – 8.0 ± 2.1 heads, in the control group – 9.4 ± 2.4 heads. No visible defects were found in any experimental groups. Analysis of the physical

development of the rat pups did not reveal any deviations from the norm. Postnatal development of first-generation rats in the control and experimental groups is characterized by high survival. In the period from 1 to 5 days of life, the survival rate of the offspring of the "Experimental 1" group was 93.8 %, in the period from 6 to 30 days of life – 91.7 %, in the "Experimental 2" group – 91.7 and 87.3 %, in the control group – 94.7 and 95.8 %, respectively. Postnatal development of rats of the second generation is also characterized by high survival in the experimental groups. In the period from 1 to 5 days of life, the survival rate of the offspring of the "Experimental 1" group was 93.9 %, in the period from 6 to 30 days of life – 91.9 %, in the "Experimental 2" group – 91.1 and 83.6 %, in the control group – 93.3 and 92.7 %, respectively. There is a tendency to decrease in the number of suckling rats in the group of animals that received genetically modified soybeans as part of the diet. The average size of the litter in rats of the experimental groups of the second generation was slightly lower compared to the size of the litter of female rats of the first generation, but was within physiological values. Comparison of the average weekly body weight gain between male and female rats of the experimental groups did not establish a significant difference between animals that consumed natural soybeans and GTS 40-3-2 soybeans, which coincides with the results obtained by Chinese scientists when animals consumed soybean flour. Comparison of the mass indices of the main organs of rats of both sexes of three generations showed that the indicators do not differ significantly. A study of the liver mass index of animals revealed that in the "Experimental 2" group, an increase in this indicator was observed compared to the control group in females of the parental generation by 23.5 %, in males – by 15.7 %. In animals of the next two generations, the trend was maintained to the increase in this indicator, but less pronounced. Since the liver plays the role of a detoxification center, it can be assumed that the response of the rat organism to the influence of certain components of the diet is activated. The results of the conducted studies indicate the absence of a probable negative or positive effect of thermally processed genetically modified soybeans on the reproductive functions of rats and the development of offspring of the first and second generations. Thus, the relevance of long-term multilateral studies remains to create a clear idea of the long-term consequences of the impact on living organisms of transgenic plants and food products containing them[7, 8].

[7] Aarts H. J. Traceability of genetically modified organisms / H. J. Aarts, J. P. van Rie, E. J. Kok. *Expert Rev. Mol. Diagn.* 2002. Vol. 2 (1). P. 69–76.

[8] Мельничук М. Д., Новак Т. В., Облап Р. В. Біотехнологія та підвищення адаптивного потенціалу сільськогосподарських культур. *Генетично модифіковані організми: проблеми і перспективи використання їх в Україні*. Київ : Аграрна наука, 2008. С. 89–97.

6. Genetically modified rice

Rice, corn, and wheat are the world's most important crops. Rice is the main food source for nearly half of the world's population, mostly in Asia. Farmers have been growing and breeding rice for thousands of years. Modern breeders are still trying to improve rice's ability to resist disease. Genetic engineering is increasingly being used to achieve these goals. Genetic engineering is one method that can be used to achieve breeding goals, namely, the creation of resistant, high-yielding varieties that require little or no spraying, bred "tailor-made" for the specific conditions of a particular region. Genetic engineering offers the opportunity to increase resistance to viral, bacterial, and fungal pathogens. Other important goals include tolerance to drought and soil salinity. Rice is grown in tropical and subtropical regions around the world. Rice cultivation is primarily concentrated in China, India, and Southeast Asia. These regions account for 90 % of the world's rice production, which is largely produced by smallholder farmers. Thailand is the world's leading rice exporter. The most important rice producer in Europe is Italy. Weed and pest control are the main reasons why 80 % of the world's rice fields are flooded. Rice was not originally an aquatic plant. Rather, it has been adapted through breeding for "flooded" conditions. Rice breeding is taking place in many countries, including projects conducted at international agricultural research centers. In 2000, the first two GM rice varieties, both herbicide-tolerant, called LLRice60 and LLRice62, were approved in the United States. These and other herbicide-resistant GM rices were later approved in Canada, Australia, Mexico, and Colombia. However, none of them reached the commercialization stage. Reuters reported in 2009 that China had granted pest-resistant GM rice biosafety status, but the line had not been commercialized. As of December 2012, GM rice was not widely available for production or consumption. China is leading the way in rice breeding research, with high hopes for new, insect-resistant rice varieties. The Chinese government is currently conducting systematic field trials of these new varieties. Results show that most farmers using GM rice have been able to stop tilling their fields altogether. In contrast to GM rice, conventional rice varieties are sprayed, on average, 3–4 times during their growing season. GM rice cultivation is expected in the near future in China, India, Indonesia and the Philippines.

Golden rice is a genetically modified variety of rice (Oryza sativa L.). Two genes were taken to modify the rice: the psy gene from the daffodil (Narcissus pseudonarcissus) and the crtl gene from the soil bacterium (Erwinia uredovora). In 2003, the concentration of beta-carotene in laboratory plants reached 1.6 μg/g. The first outdoor harvest was obtained in 2004 in the city

of Crowley, Louisiana, USA, as it is one of the few countries that has not banned the genetic modification of food plants. In 2005, the biotech company Syngenta created an improved variety called Golden Rice 2 – a rice variety with an increased content of beta-carotene, a metabolic precursor of vitamin A. The content of beta-carotene in it was increased times compared to the first version. Since 2012, golden rice has already begun to be harvested in China and the Philippines. The year 2014 is considered a turning point in the spread of this crop and, thanks to the help of the Bill and Melinda Gates Foundation, three and a half million farmers have already grown rice with the Sub1 gene. As is known, rice contains a small amount of iron and vitamin A. In regions where rice is a staple food, vitamin A deficiency is observed in the indigenous population, which leads to vision problems and, in some cases, blindness. According to WHO data from 2009 and 2012, 190 to 250 million preschool children worldwide each year still suffered from vitamin A deficiency. Studies have shown that vitamin A supplementation can reduce mortality among children under 5 years of age by 24–30 %. This means that the availability of vitamin A in 8 million children of late childhood and preschool age in malnourished families could prevent 1.3 to 2.5 million child deaths per year. An average serving of "golden" rice can cover half of the daily requirement of the vitamin for a young child[9].

In Japan, work is underway to develop varieties of rice that will pose less of a problem for people with rice allergies. To achieve this, researchers are trying to reduce the activity of the gene that leads to the formation of an important allergen (AS-albumin). So far, researchers have not been able to completely eliminate traces of albumin. In the UK (Department for International Development), a rice variety resistant to yellow spot virus has been developed. In Zurich, a rice variety resistant to yellow spot virus has been developed. resistant to Tungro virus and various fungi. Ventria Bioscience has developed rice varieties that can produce human proteins. For example, one of these varieties synthesizes human lactoferrin and lysozyme. These two proteins are present in breast milk and are widely used in the production of baby food and rehydration products. Several insect-resistant rice varieties have been developed and tested in large quantities in China. To make rice varieties resistant to insect pests, the same technologies were used as for corn – the introduction of genes from the bacterium Bacillus thuringiensis to synthesize entomootoxins in rice plants. These varieties can resist a wide range of pests, while other rice varieties need to be treated with insecticides three to four times during the growing season. Bt rice has been widely grown

[9] W.-D. Fessner Biocatalysis: From Discovery to Application. 2000. 268 p.

in Chinese fields since 2009. 140 In addition, many field trials are underway in India with insect-resistant Bt rice. A number of research projects are related to the development of new rice varieties that can survive with less water and can grow in saline soil. In China, salt-tolerant varieties have already been developed, into which a gene has been transferred from Suaeda salsa, a plant that also grows in saline soil. A similar rice variety is also undergoing field trials in Europe, the USA and India. Scientists at the University of California have developed a type of GM rice that can withstand flooding for more than two weeks. In Japan, work is underway to develop a hypoallergenic type of rice in which the formation of allergens (AS-albumin, glutenin) is suppressed. In other GM rice varieties, the starch composition (amylose) or protein content has been changed. Sake producers could be potential buyers. Therefore, new achievements in genetic engineering are of great importance for agriculture, since some varieties of plants bred using new technologies are already finding their place in the sown areas of various countries[10, 11, 12].

7. Food safety and genetics

Food safety problems are complex, and their solution requires numerous efforts from scientists, manufacturers, sanitary and epidemiological services, government agencies, and consumers. The relevance of this problem is growing every year, since food safety directly affects not only human health, but also the preservation of the gene pool of humanity as a whole. Genetics, molecular biology, and molecular genetics use a number of common methods and approaches, which together constitute a methodology – a certain way of studying hereditary material (DNA). An important applied value of the methods used in these subject areas is their use for assessing dangerous factors for human life and health. In view of this, the development of a methodology for assessing the safety and quality of agricultural raw materials of animal and plant origin, as well as ready-to-eat food products based on molecular genetic approaches is of scientific interest and has practical significance. The last decades have been marked by significant progress in the development and application of approaches to determining DNA polymorphism and the selection of appropriate molecular genetic marker systems that would contribute to the wider implementation of modern molecular genetic methods and assessment technologies to improve the safety and quality of products in the agricultural

[10] Lilia Alberghina Protein Engineering For Industrial Biotechnology. 2003. 374 p.

[11] Roger L. Lundblad Biochemistry and Molecular Biology Compendium. 2007. 422 p.

[12] Облап Р. В. Сучасні методи визначення ГМО в харчових продуктах та продовольчій сировині рослинного походження. *Вісник Сумського національного аграрного університету.* 2012. Вип. 10 (20). С. 117–121.

sector. Today, the following main areas of development of DNA technologies for the needs of the agri-food sector are distinguished: development of molecular methods for diagnosing and controlling the safety and quality of agricultural raw materials of animal and plant origin; diagnostics of infectious diseases of agricultural animal species and phytosanitary quarantine control; detection of genetic diseases of animals at early stages of development; genotyping of organisms to create genetic passports of breeds, species, taxonomic groups; marker-associated selection (MAS). In Ukraine, over the past twenty years, numerous studies have been conducted on the application of modern achievements in molecular genetics and varieties of molecular genetic markers in a wide variety of branches of domestic animal husbandry, plant breeding, and food microbiology[13, 14]. Despite this, there is a significant shortage of work on the practical application of modern achievements in genetics and developments in the selection of high-yielding animal breeds, obtaining plant varieties with improved properties, and developing systems for monitoring the safety and quality of agricultural raw materials and food products at all stages of their production.

Food safety and quality are among the most important factors determining the health of nations. Recent decades have been characterized by a steady deterioration in the health indicators of our country's population. Of course, this is primarily due to a decrease in the quality of life, a low level of social protection, and a poor healthcare system. As a result, life expectancy in Ukraine is one of the lowest in Europe and is on average 76.0 years for women and 66.2 years for men. According to WHO and the State Statistics Service of Ukraine, mortality per 1,000 people increased from 12.10 in 1990 to 25.2 in 2020. Among the causes of high morbidity and mortality, cardiovascular and oncological diseases occupy a leading place, the development of which is associated, among other reasons, with nutrition. Every person has an inalienable natural right to the security of his life. One of the important elements of life safety is food safety[15, 16].

---

[13] Облап Р. В., Новак Н. Б., Семенович В. К., Димань Т. Н. Розроблення діагностичної тест-системи для якісного визначення ГМО у продовольчій сировині і харчових продуктах. *Технологія виробництва і переробки продукції тваринництва*. 2012. Вип. 7 (90). С. 78–81.

[14] Димань Т. М., Козловська М. В., Облап Р. В., Дубін О. В., Кравченко О. І. Генетично модифіковані сільськогосподарські культури: прогрес, проблеми, перспективи : монографія / за ред. Т. М. Димань, Л. Г. Шморгун. Серія: Імплементація європейських норм і практик. Регулювання ринків та дослідництво в умовах СОТ. Київ : Проблеми інноваційно-інвестиційного розвитку, 2013. 158 с.

[15] Кошкалда І. В. Актуальні питання продовольчого забезпечення. *Вісник Сумського національного аграрного університету.* 2017. Вип. 4 (71). С. 207–212.

[16] Єгоров Б., Мардар М. Стан харчування населення України. *Товари і ринки.* 2011. № 1. С. 140–147.

After all, it is well known that the consequences of consuming low-quality and unsafe food products can be a danger to human health of varying degrees, up to and including fatal cases. Food poisoning, in addition to harming the health of a particular consumer, causes significant losses to the economy and the image of the state, manufacturing enterprises, trade, tourism, etc. To prevent these adverse consequences, each state implements certain principles of state policy to ensure the safety and quality of food products and food raw materials.

Trends in world economic policy have placed Ukraine in the need to make radical decisions regarding the harmonization of legislation in the field of food production with international standards and the adaptation of national food safety standards to world requirements. In modern conditions, the successful process of Ukraine's integration into world economic cooperation is impossible without coordinating efforts to ensure the production of safe and high-quality food products. To this end, food industry enterprises are developing and implementing safety and quality management systems, for the successful use of which it is necessary to adhere to the general principles of food hygiene. The modern attitude towards food safety has been formed relatively recently. The increase in environmental pollution, the introduction of new food production technologies, the use of genetic engineering and biotechnology, the globalization of modern food production and the strengthening of international trade relations between countries have prompted the introduction of new international food legislation in order to introduce stricter requirements for the safety and quality of food products. In view of this, in 1963, the Food and Agriculture Organization of the United Nations (FAO) and the World Health Organization (WHO) established the Codex Alimentarius Commission. The main objective of the Commission was to create a set of internationally recognized standards for food products. This became the starting point for the development of requirements for ensuring the safety and quality of food products at the national levels[17, 18].

The crisis in the food industry, associated with outbreaks of infectious diseases of farm animals (foot-and-mouth disease, transmissible spongiform encephalopathy of cattle, avian influenza), the detection of hormones in pork, antibiotics in honey, dioxins in poultry, etc., led to the development and justification of new approaches to risk management in the field of food safety. These approaches were included in the Green Paper (1997) and the

[17] Безпека продовольчої сировини і харчових продуктів / за ред. Т. М. Димань, Т. Г. Мазур. Київ : ВЦ «Академія», 2011. 520 с.

[18] Гаряча Ю. П. Правові засади внутрішнього ринку Європейського Союзу. *Стратегічні пріоритети.* 2009. № 1 (10). С. 275–279.

White Paper (2000) on food safety, and later transformed into a number of regulatory documents of the main EU legislation[19]. Today, a global and integrated approach to the food safety system includes a number of fundamental points, such as, among others, the recognition of animals as sentient beings; mandatory state control over all links in the food production and consumption chain; differentiation of responsibility for compliance with safety principles; the right to objective and timely information; increasing public trust in food producers; introduction of effective systems for monitoring and evaluating the effectiveness of national authorities. Today, ensuring the quality of food raw materials and food products in production is achieved by introducing and adhering to product quality management systems, as well as standards that regulate the requirements for them. International organizations have developed and implemented a number of systems to ensure the quality and safety of food products. One of such systems is the HACCP system. HACCP is the most common method of ensuring the safety and quality of food products. This system is based on such basic principles as conducting a risk analysis, determining critical control points, determining critical limits, creating a monitoring system for critical control points, describing corrective actions, determining procedures for verifying the effectiveness of the HACCP system, documenting all procedures and recording evidence[20, 21]. Food safety problems are complex, and their solution requires numerous efforts from scientists, manufacturers, sanitary and epidemiological services, government agencies, and consumers.

The relevance of this problem is growing every year, since food safety directly affects not only human health, but also the preservation of the gene pool of humanity as a whole. Food safety is primarily the absence of direct danger to human health when consuming food (food poisoning, food infections), as well as the absence of the danger of long-term consequences (carcinogenic, mutagenic and teratogenic effects). Thus, food products that do not harm the health of not only the current generation, but also the future are considered safe.

---

[19] Варченко О. М., Крисанов Д. Ф., Артімонова І. В. Формування європейської моделі безпечності харчових продуктів та її впровадження на підприємствах аграрного сектору України. *Економіка та управління АПК.* 2016. № 1–2. С. 15–29.

[20] Назаренко Л. О. Ідентифікація та фальсифікація продовольчих товарів : навч. посіб. / за ред. Л. О. Назаренка. Київ : Центр учбової літератури, 2014. 248 с.

[21] Бочарова О. В. НАССР і системи управління безпечністю харчової продукції : навч. посіб. / за ред. О. В. Бочарової. Одеса : Атлант, 2019. 376 с.

CONCLUSIONS

With food, substances hazardous to health can enter the human body in significant quantities. Today, the issue of increasing the responsibility of producers to ensure effective mechanisms for controlling the quality of food products and guaranteeing their safety for the health of the consumer is very acute. The safety of food products is assessed according to sanitary and hygienic standards, which include biological objects, potentially dangerous chemical compounds, radionuclides and harmful plant impurities. Their presence in food products must be regulated and not exceed permissible standards. More than half of the harmful substances that regularly enter the human body come with food. Therefore, ensuring the environmental safety of food products is extremely important. In recent years, the relevance of this problem has further increased due to the widespread use of various types of food additives and new packaging materials. In addition, a large number of small enterprises have appeared, where the technological process of food production is not sufficiently controlled. Hazardous substances can enter food products at the stage of obtaining food raw materials from environmental objects, as a result of the introduction of special additives during the production of food products to improve taste, improve appearance or increase shelf life. The safety of food products can also decrease when new production technologies are used, such as genetic engineering or radiation exposure. The decrease in environmental safety at the stage of production of raw materials of plant and animal origin occurs as a result of the absorption and accumulation of chemical substances by these organisms. The accumulation process can occur through bioconcentration, biomultiplication or bioaccumulation. In the first case, the accumulation of chemicals occurs due to direct perception from the environment, in the second – during nutrition, in the third – both due to the environment and food products. Thus, in connection with global pollution of the external environment, the problem of foreign substances entering food products and raw materials acquires socio-medical and socio-economic significance. The relevance and complexity of this problem at the current stage of industrial development is determined not only by the fact that new substances enter nature every day, new combinations of chemical compounds are formed, the action of which is unstudied, but also by the fact that methods for determining foreign substances are largely cumbersome, laborious and, unfortunately, not always accurate. If at the beginning of the 20th century, thanks to the successes of medical and biological sciences, as well as preventive measures, many diseases lost their leading role, then at present, due to environmental problems, the number of diseases is increasing.

SUMMARY

The safety and quality of agricultural raw materials and food products is one of the crucial components of the economic security of each state and is determined by the country's ability to effectively control the production, export and import of food on generally recognized principles. In developed countries, there is a multi-level system of protection of the population from substandard goods, which is based on quality control. Monitoring and control of the safety and quality of agricultural raw materials and food products is impossible without the availability of appropriate analytical methods of analysis and diagnostic test systems. Therefore, today, great attention is paid to the development of modern highly effective approaches and methods for detecting safety and quality indicators.

One of the critical points during the detection of GMOs and the determination of their quantitative content for both DNA and protein analysis methods is sample preparation. In this case, it is important to take into account not only the limitations of each of the sample preparation stages, but also the specifics of the analysis. The final result is also significantly affected by the size of the sample and the procedure for its selection. An equally important stage in the development of methods for the determination of GMOs based on DNA analysis is the optimization of the DNA extraction procedure. This is primarily due to the fact that, firstly, food samples contain a fairly high amount of inhibitory agents, and secondly, the vast majority of them undergo heat treatment. Today, there are a number of approaches to the determination of transgenic organisms, but the most common are two, in particular, the enzyme-linked immunosorbent assay method and the polymerase chain reaction method. Enzyme-linked immunosorbent assay (ELISA) involves testing for the presence of specific proteins using specific binding between an expressed antigen and an antibody. Polymerase chain reaction (PCR) is based on the detection of DNA sequences introduced into a given crop. These methods can be used both for qualitative analysis, showing the presence or absence of GMOs, and for determining the quantitative (percentage) content of GMOs in the sample under study.

Bibliography

1. Юлевич О. І. Біотехнологія : навчальний посібник / О. І. Юлевич, С. І. Ковтун, М. І. Гиль ; за ред. М. І. Гиль. Миколаїв : МДАУ, 2012. 476 с.

2. Теплоухов Б. П. Зброя масового знищення та захист від неї. Київ : Скіф, 2023. 100 с.

3. Півень О. Без ГМО: правда і страшилки про генну інженерію. Київ : Віхола, 2022. 178 с.

4. Paul Knoepfler GMO Sapiens: The Life-Changing Science of Designer Babies. NY : WSPS, 2015. 282 p.

5. Wunderlich S., Gatto K. A. Consumer Perception of Genetically Modified Organisms and Sources of Information. *Adv. Nutr*. 2015. Vol. 6. P. 842–851.

6. Guidance on the EU menu Methodology / European Food Safety Authority. *EFSA Journal*. 2014. Vol. 12 (12). Art. 3944. 77 pp. DOI: 10:2903 j.efsa.2014.3944.

7. Aarts H. J. Traceability of genetically modified organisms / H. J. Aarts, J. P. van Rie, E. J. Kok. *Expert Rev. Mol. Diagn*. 2002. Vol. 2 (1). P. 69–76.

8. Мельничук М. Д., Новак Т. В., Облап Р. В. Біотехнологія та підвищення адаптивного потенціалу сільськогосподарських культур. Генетично модифіковані організми: проблеми і перспективи використання їх в Україні. Київ : Аграрна наука, 2008. С. 89–97.

9. Roger L. Lundblad Biochemistry and Molecular Biology Compendium. 2007. 422 p.

10. Lilia Alberghina Protein Engineering For Industrial Biotechnology. 2003. 374 p.

11. Roger L. Lundblad Biochemistry and Molecular Biology Compendium. 2007. 422 p.

12. Облап Р. В. Сучасні методи визначення ГМО в харчових продуктах та продовольчій сировині рослинного походження. *Вісник Сумського національного аграрного університету.* 2012. Вип. 10 (20). С. 117–121.

13. Облап Р. В., Новак Н. Б., Семенович В. К., Димань Т. Н. Розроблення діагностичної тест-системи для якісного визначення ГМО у продовольчій сировині і харчових продуктах. *Технологія виробництва і переробки продукції тваринництва*. 2012. Вип. 7 (90). С. 78–81.

14. Димань Т. М., Козловська М. В., Облап Р. В., Дубін О. В., Кравченко О. І. Генетично модифіковані сільськогосподарські культури: прогрес, проблеми, перспективи : монографія / за ред. Т. М. Димань, Л. Г. Шморгун. Серія: Імплементація європейських норм і практик. Регулювання ринків та дослідництво в умовах СОТ. Київ : Проблеми інноваційно-інвестиційного розвитку, 2013. 158 с.

15. Кошкалда І. В. Актуальні питання продовольчого забезпечення. *Вісник Сумського національного аграрного університету.* 2017. Вип. 4 (71). С. 207– 212.

16. Єгоров Б., Мардар М. Стан харчування населення України. *Товари і ринки*. 2011. № 1. С. 140–147.

17. Безпека продовольчої сировини і харчових продуктів / за ред. Т. М. Димань, Т. Г. Мазур. Київ : ВЦ «Академія», 2011. 520 с.

18. Гаряча Ю. П. Правові засади внутрішнього ринку Європейського Союзу. *Стратегічні пріоритети*. 2009. № 1 (10). С. 275–279.

19. Варченко О. М., Крисанов Д. Ф., Артімонова І. В. Формування європейської моделі безпечності харчових продуктів та її впровадження на підприємствах аграрного сектору України. *Економіка та управління АПК*. 2016. № 1–2. С. 15–29.

20. Назаренко Л. О. Ідентифікація та фальсифікація продовольчих товарів : навч. посіб. / за ред. Л. О. Назаренка. Київ : Центр учбової літератури, 2014. 248 с.

21. Бочарова О. В. НАССР і системи управління безпечністю харчової продукції : навч. посіб. / за ред. О. В. Бочарової. Одеса : Атлант, 2019. 376 с.

Information about the authors:
Kichura Dariia Bohdanivna,
Candidate of Technical Sciences,
Associate Professor at the Department of Organic Substances,
Institute of Chemistry and Chemical Technologies,
Lviv Polytechnic National University
12, Stepana Bandery street, Lviv, 79013, Ukraine

Sobechko Iryna Borysivna,
Doctor of Chemical Sciences,
Associate Professor at the Department of physical,
analytical and general chemistry,
Institute of Chemistry and Chemical Technologies,
Lviv Polytechnic National University
12, Stepana Bandery street, Lviv, 79013, Ukraine

CHAPTER 16

РЕГУЛЮВАННЯ БІОЕТИЧНИХ АСПЕКТІВ НАУКОВИХ ДОСЛІДЖЕНЬ

Лавринюк О. О., Мудренко В. П.
DOI https://doi.org/10.30525/978-9934-26-654-6-16

ВСТУП

Сучасний етап розвитку біомедичної науки характеризується безпрецедентним прискоренням інтеграції високих технологій у клінічну та лабораторну практику. Редагування геному, синтетична біологія, розробка нанопрепаратів та застосування штучного інтелекту в діагностиці відкривають колосальні перспективи для подолання раніше невиліковних хвороб. Однак цей технологічний стрибок створює глибокий розрив між інноваційними можливостями науки та існуючими нормативно-етичними межами. У 2026 році питання етичної регламентації медико-біологічних досліджень трансформується з теоретичної площини біоетики у стратегічний фактор національної безпеки та міжнародного наукового співробітництва[1].

Актуальність дослідження етичних аспектів на людях обумовлена переходом до моделі персоніфікованої медицини. Традиційна концепція інформованої згоди сьогодні зазнає трансформації під впливом «великих даних» (Big Data). Виникає критична потреба у переосмисленні приватності генетичної інформації та прав пацієнта в умовах, коли біологічний матеріал стає об'єктом цифрового моделювання. Етичні колізії виникають і в питаннях інклюзивності: залучення вразливих верств населення до клінічних випробувань вимагає не лише юридичних гарантій, а й розробки складних механізмів соціальної та моральної відповідальності дослідників[2].

Паралельно з цим, проблема етичного поводження з тваринами у доклінічних випробуваннях набуває нової гостроти. Попри активну

[1] Budin-Ljøsne I., Teare H. J., Kaye J. et al. Dynamic Consent: a potential solution to ethical and legal challenges of modern biomedical databases. *Human Genomics*. 2017. Vol. 11, No. 1. Art. 4. DOI: https://doi.org/10.1186/s40246-017-0103-x.

[2] The Belmont Report: Ethical Principles and Guidelines for the Protection of Human Subjects of Research / U. S. Department of Health and Human Services. URL: https://www.hhs.gov/ohrp/regulations-and-policy/belmont-report/index.html

пропаганду гуманізації науки, повна відмова від використання тваринних моделей у найближчій перспективі залишається неможливою через складність системних біологічних реакцій, які поки не здатні повноцінно відтворити методи *in vitro* або *in silico*[3]. У зв'язку з цим, актуалізується необхідність суворої імплементації концепції 3R (Replacement, Reduction, Refinement) у діяльність етичних комітетів. Особливої уваги потребує розробка «гуманних кінцевих точок» (humane endpoints), що дозволяють мінімізувати страждання тварин без втрати наукової достовірності результатів[4].

Суперечність між необхідністю отримання достовірних наукових даних для порятунку життів та моральним обов'язком дотримуватися принципів біоетики становить головний виклик для сучасної наукової спільноти. Відсутність уніфікованих міжнародних стандартів, що враховували б останні досягнення біотехнологій, призводить до появи «етичного демпінгу» – перенесення ризикованих досліджень у країни зі слабким регуляторним законодавством. Це робить комплексний аналіз регуляторних механізмів, що забезпечують баланс між науковою свободою та етичними імперативами, надзвичайно своєчасним та необхідним для подальшого сталого розвитку медицини та біології.

Таким чином, наукове обґрунтування нових підходів до біоетичного контролю є фундаментом для легітимізації майбутніх відкриттів та підтримки суспільної довіри до науки.

Питання біоетичного регулювання протягом останніх років перебувають у центрі уваги як вітчизняних, так і закордонних учених. Фундаментальні засади захисту прав учасників досліджень закладені у працях Дж. Чілдреса та Т. Бічампа, чия «чотирипринципна модель» (автономія, благодіяння, нешкідливість, справедливість) залишається класичним базисом.

У сучасних публікаціях (2023–2025 рр.) особливий акцент робиться на цифровізації біоетики[5]. Проблематика етичного поводження з тваринами детально висвітлюється у звітах NC3Rs (Національного центру 3Rs, Велика Британія), де наголошується на переході до "NAMs"

[3] Директива 2010/63/ЄС Європейського Парламенту та Ради від 22 вересня 2010 року про захист тварин, які використовуються для наукових цілей. URL: https://eur-lex.europa.eu/legal-content/EN/TXT/?uri=celex%3A32010L0063

[4] OECD Series on Testing and Assessment. Guidance Document on Humane Endpoints for Animals Used in Safety Evaluation. URL: https://www.oecd.org/env/ehs/testing/

[5] AI in Drug Discovery: Ethical and Regulatory Frameworks. *Nature Biotechnology*. 2024. Vol. 42. P. 210–218. URL: https://www.nature.com/nbt/

(New Approach Methodologies) – інноваційних методів, що мають замінити тваринні моделі[6].

Попри значну кількість напрацювань, залишається недостатньо вивченим питання гармонізації етичних протоколів у транснаціональних дослідженнях, особливо в контексті використання генетично модифікованих організмів та редагування зародкової лінії людини, що й зумовлює необхідність даного дослідження.

Метою статті є комплексний аналіз сучасних етичних викликів у медико-біологічній сфері та оцінка ефективності існуючих регуляторних механізмів, що забезпечують захист суб'єктів дослідження (людей та тварин) в умовах стрімкого технологічного прогресу.

Для досягнення поставленої мети було використано комплекс наукових методів: системно-аналітичний метод (для вивчення міжнародної нормативно-правової бази (Гельсінська декларація, стандарти ICH GCP)[7], порівняльно-правовий метод (для зіставлення підходів до біоетичного регулювання в країнах ЄС, США та Україні)[8], метод термінологічного аналізу (для уточнення дефініцій «цифрова згода» та «гуманні кінцеві точки»), аксіологічний підхід (для оцінки морально-ціннісних аспектів втручання в біологічну природу живих істот).

1. Еволюція інформованої згоди в епоху біотехнологічного моніторингу

Трансформація інституту інформованої згоди (ІЗ) відображає перехід від статичної біоетичної моделі до динамічного цифрового супроводу суб'єкта дослідження. У контексті інтенсивного розвитку високопродуктивного секвенування та біобанкінгу, традиційна «разова згода» виявляє свою неспроможність забезпечити належний рівень автономії учасника в умовах тривалого використання його біологічного матеріалу.

Сучасна трансформація біоетичних стандартів зумовлює перехід від статичної моделі інформованої згоди до концепції динамічної згоди (*dynamic consent*), що знаменує фундаментальну зміну парадигми: від пасивного одноразового надання дозволу до активного управління

[6] NC3Rs Self-Assessment Tools for Research Institutions / National Centre for the Replacement, Refinement and Reduction of Animals in Research. URL: https://nc3rs.org.uk/

[7] Гельсінська декларація Всесвітньої медичної асоціації: Етичні принципи медичних досліджень за участю людини : прийнята 18-ю Ген. асамблеєю ВМА, Гельсінкі, Фінляндія, червень 1964 р. (ред. від 2008 р.). URL: https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/990_005

[8] Про захист тварин від жорстокого поводження : Закон України від 21.02.2006 № 3447-IV. URL: https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/3447-15

суб'єктом власними біометричними даними протягом усього наукового циклу. Цей підхід базується на впровадженні персоналізованих інтерфейсів, таких як спеціалізовані веб-портали та мобільні застосунки, що забезпечують безперервний канал зв'язку між дослідником та донором. Завдяки цьому учасник отримує актуальну інформацію про нові цілі використання його біозразків або проміжні результати, що мають для нього пряме клінічне значення, що перетворює формальну процедуру на реальний процес поінформованої участі.

Ключовим операційним елементом цієї моделі є *гранулярність контролю*, яка реалізується через модульний підхід до надання дозволів. На відміну від традиційної бінарної логіки, учасник отримує інструментарій для диференційованого управління доступом: він може схвалити використання своїх даних для специфічних напрямів (наприклад, онкогенетичних досліджень), водночас накладаючи вето на інші сфери (зокрема, комерційні розробки або тестування в галузі психіатрії). Така деталізація дозволяє гармонізувати науковий пошук із особистими етичними чи релігійними переконаннями суб'єкта, значно підвищуючи рівень суспільної довіри до біомедичних інституцій.

Особливе місце в архітектурі динамічної згоди посідає принцип *ретроспективної автономії*, який гарантує учаснику право змінити своє рішення в будь-який момент часу (*right to withdraw*). У контексті довготривалого біобанкінгу цей метод забезпечує юридичну та етичну гнучкість: хоча дані, вже інтегровані в агреговані наукові звіти, залишаються для збереження цілісності дослідження, динамічна згода забезпечує негайне припинення будь-якої подальшої обробки інформації та гарантує анонімізацію або фізичне знищення зразків. Таким чином, згода трансформується з разового бюрократичного акту на живий, технічно забезпечений процес постійної валідації волі особи.

Психологічна трансформація та "Digital Empowerment". Впровадження динамічної згоди змінює саму природу взаємовідносин між пацієнтом та наукою, переводячи донора з позиції «джерела біоматеріалу» у статус повноправного партнера (*citizen scientist*). Використання інтерактивних систем дозволяє подолати інформаційну асиметрію: учасник бачить не лише сухі юридичні формулювання, а й реальний внесок своїх даних у глобальний науковий прогрес через візуалізовані звіти про використання його зразків. Це створює позитивну петлю зворотного зв'язку, де високий рівень автономії стимулює тривалу лояльність до дослідження, що є критичним для довгострокових когортних спостережень.

Механізм адаптивного інформування. Окрім гранулярності, сучасна модель передбачає інтеграцію багатошарового інформування

(*layered disclosure*). Замість одномоментної видачі всього обсягу технічної інформації, система пропонує дані ієрархічно: від коротких тез (summary) до глибоких описів генетичних маніпуляцій. Такий підхід мінімізує когнітивне навантаження та запобігає формальному підписанню документів через їх складність. У поєднанні з можливістю онлайн-консультування з етичним куратором (через чат-боти або відеозв'язок), це забезпечує найвищий стандарт «усвідомленості» згоди, задекларований у Гельсінській декларації.

Регуляторна стійкість та міжнародна сумісність. Важливою перевагою динамічного підходу є його здатність адаптуватися до змін у законодавстві без необхідності фізичного перепідписання документів. У разі появи нових регуляторних актів (наприклад, оновлень у сфері захисту генетичної інформації), платформа автоматично оновлює налаштування конфіденційності та надсилає учаснику запит на підтвердження нових умов лише в тих пунктах, що змінилися. Це забезпечує безперервність юридичної чистоти дослідження навіть у динамічному правовому полі поточного року, що робить динамічну згоду ідеальним інструментом для міжнародних мультицентрових випробувань.

Архітектурна модель біомедичних досліджень зразка 2026 року базується на інтеграції децентралізованих технологій для вирішення фундаментальної дилеми біоетики: дотримання балансу між принципом відкритої науки (*Open Science*) та безумовним правом індивіда на конфіденційність. Ключовим інструментом у цьому процесі виступає технологія блокчейн, яка в поєднанні з методами *федеративного навчання (Federated Learning)* дозволяє проводити масштабні аналітичні дослідження без фізичного переміщення деанонімізованих даних за межі безпечного периметра первинних баз даних. Така синергія гарантує, що конфіденційна інформація залишається локалізованою, а наукова спільнота отримує лише необхідні результати обчислень[9].

Логіка функціонування такої системи реалізується через триетапний алгоритм управління доступом. На першому етапі здійснюється *хешування згоди:* будь-яка зміна етичних преференцій користувача фіксується в розподіленому реєстрі як незмінна транзакція, що виключає можливість ретроспективного маніпулювання згодою. Далі залучаються *смарт-контракти на доступ*, які виконують роль автоматизованих етичних контролерів, блокуючи будь-які запити, що не відповідають гранулярним налаштуванням учасника. Завершальною ланкою є *аудит*

[9] E6(R3) Draft Guideline on Good Clinical Practice (GCP) / International Council for Harmonisation (ICH). 2023. URL: https://www.ich.org/page/efficacy-guidelines

використання, що дозволяє донору через персоналізований цифровий кабінет у реальному часі відстежувати повний перелік установ, які працювали з його матеріалом.

Для детального розуміння того, як саме програмні модулі забезпечують дотримання етичних стандартів, необхідно розглянути функціональну структуру кожного елемента системи. Це дозволяє простежити зв'язок між технічними параметрами платформи та гарантіями захисту суб'єкта дослідження, які систематизовано у наведеній нижче специфікації (таблиця 1).

Таблиця 1

Технічна реалізація функцій динамічної згоди в архітектурі блокчейн

Компонент системи	Функціональне призначення	Етична валідація
Криптографічний хеш	Створення унікального цифрового відбитка акту згоди	Гарантія цілісності та неможливості фальсифікації волевиявлення
Смарт-контракт	Автоматизований програмний контроль доступу до даних	Технічне унеможливлення несанкціонованого або нецільового аналізу
Immutable Ledger	Формування незмінного та послідовного журналу транзакцій	Забезпечення повної транспарентності для аудиту та учасника
API-інтеграція	Динамічний зв'язок між реєстрами, біобанками та лабораторіями	Синхронізація актуального статусу згоди в режимі реального часу

Примітка. Платформи як **MIDATA**[10] (Швейцарія) та **LunaDNA**[11] (США) вже інтегрували ці механізми, дозволяючи токенізувати права доступу, що дозволяє користувачам бачити реальну цінність свого внеску в науку.

Інтеграція високотехнологічних рішень у біоетичну практику не лише розширює можливості учасників, а й видозмінює ландшафт потенційних загроз. У 2026 році перехід до цифрового супроводу досліджень вимагає від наукової спільноти відмови від реактивного підходу на користь превентивного моделювання ризиків. Це означає, що етична експертиза проекту сьогодні включає обов'язковий стрес-тест не лише медичних маніпуляцій, а й інформаційної архітектури системи згоди.

[10] MIDATA Cooperative. Citizen-owned data cooperatives: A new era for health research and digital sovereignty. 2026. URL: https://www.midata.coop

[11] LunaDNA. Privacy-Preserving Research and Genomic Data Ownership Platforms. 2025. URL: https://www.lunadna.com

Основним викликом залишається дотримання балансу між високою інтенсивністю взаємодії та когнітивним добробутом учасника. Соціально-технічні вразливості, такі як цифрова нерівність або феномен «втоми від згоди», можуть нівелювати переваги автономії, якщо вони не будуть враховані на етапі проектування інтерфейсів. Крім того, динамічний характер даних у реальному часі висуває безпрецедентні вимоги до стійкості криптографічних протоколів.

Для системної оцінки цих викликів та розробки ефективних контрзаходів було виокремлено ключові категорії ризиків, що супроводжують впровадження динамічного моніторингу. У наведеній нижче таблиці деталізовано стратегії, які дозволяють трансформувати виявлені вразливості у керовані параметри етичної безпеки дослідження.

Таблиця 2

Етичні ризики та стратегії їх нівелювання в системах біотехнологічного моніторингу

Тип ризику	Опис проблеми	Механізм нівелювання
Цифровий розрив	Нерівний доступ до технологій динамічної згоди серед різних соціальних груп	Впровадження гібридних моделей (паперові дублікати, залучення етичних посередників чи довірених осіб)
«Втома від згоди»	Психологічне перевантаження та формалізація вибору через надмірну кількість цифрових сповіщень	Використання адаптивних ШІ-асистентів для пре-фільтрації запитів згідно з наперед визначеним етичним профілем
Кібербезпека	Ризик несанкціонованого зламу реєстрів, витоку метаданих або деанонімізації біопрофілів	Застосування квантово-стійкого шифрування, гомоморфного кодування та асиметричних протоколів захисту

Примітка. Платформа LunaDNA частково вирішує проблему втоми від згоди через «гранулярні» налаштування профілю, де користувач заздалегідь визначає пріоритетні сфери досліджень.

Станом на 2026 рік фундаментальним вектором розвитку біомедичного права стала системна гармонізація Загального регламенту про захист даних *(GDPR)* із новими вимогами Європейського акту про штучний інтелект *(EU AI Act)*. Ця синергія дозволила впровадити концепцію *"Compliance by Design"* (відповідність через проектування), де правові норми інтегруються безпосередньо в архітектуру дослідницьких платформ[12]. Такий підхід перетворює етичні вимоги

[12] Privacy-Preserving Federated Learning in Medical AI: Ethics and Implementation. *IEEE Transactions on Medical Imaging*. 2025. Vol. 44, No. 2. P. 560–575. URL: https://ieeexplore.ieee.org/journal/42

з пасивних регуляторних обмежень на активні програмні алгоритми, що забезпечують автоматичну валідацію кожної операції з даними.

У контексті *GDPR Compliance,* використання смарт-контрактів радикально спрощує реалізацію Статті 17 (Право на забуття). Якщо раніше процес відкликання згоди був обтяжений бюрократичними процедурами та людським фактором, то в сучасних системах анулювання згоди учасником у мобільному інтерфейсі ініціює миттєву транзакцію в блокчейні. Це призводить до автоматичного знищення або блокування криптографічних ключів доступу, що робить подальшу обробку біоінформації технічно неможливою для будь-яких дослідницьких груп у режимі реального часу.

Паралельно з цим, *AI Act Integration* вимагає від розробників систем ШІ у медицині безпрецедентного рівня прозорості. Динамічна згода виступає тут ключовим інструментом підзвітності: вона надає учаснику персоналізований звіт про те, які саме алгоритми та моделі машинного навчання обробляли його дані, з якою метою та які результати було отримано. Таким чином, замість «чорної скриньки» ШІ-аналізу, пацієнт отримує зрозумілу карту використання свого цифрового фенотипу, що зміцнює етичний фундамент сучасних клінічних випробувань.

Особливу гостроту питання безпеки набуває при роботі з повним геномним секвенуванням, де дані є настільки унікальними, що традиційна анонімізація часто виявляється недостатньою. Наразі наукова спільнота остаточно перейшла від адміністративних методів захисту до використання *технологій посилення конфіденційності (Privacy-Enhancing Technologies, PETs).* Ці інструменти дозволяють реалізувати математично доказову приватність, де право на анонімність гарантується не просто регламентом установи, а самою структурою даних.

Застосування PETs створює умови для глибокого аналізу великих масивів біоінформації без необхідності дешифрування персональних ідентифікаторів. Це дозволяє дослідникам виявляти кореляції між генетичними маркерами та патологіями, зберігаючи при цьому «цифрову непрозорість» конкретного донора. Такий підхід радикально знижує ризики випадкової деанонімізації через перехресні посилання між базами даних, що є критично важливим для пацієнтів із рідкісними захворюваннями.

Для систематизації технічних рішень, що забезпечують такий високий рівень етичного захисту, доцільно розглянути ключовий інструментарій PETs. У наступній таблиці наведено аналіз найбільш ефективних методів, які стали стандартом для сучасних біобанків та міжнародних дослідницьких консорціумів.

Таблиця 3

Інструментарій Privacy-Enhancing Technologies (PETs) у світлі сучасних етичних стандартів

Технологія	Механізм обробки даних	Етико-правова перевага
Диференційна приватність	Ін'єкція статистичного шуму в набори даних перед аналізом	Унеможливлює ідентифікацію особи шляхом співставлення з іншими базами даних
Гомоморфне шифрування	Виконання математичних операцій безпосередньо над зашифрованим кодом	Дослідник отримує лише кінцевий результат, не бачачи «сирих» генетичних даних
Докази з нульовим розголошенням (ZKP)	Валідація твердження без розкриття самої інформації (наприклад, підтвердження діагнозу)	Мінімізація обсягу даних, що передаються третім сторонам
Синтетичні дані	Генерація штучних копій реальних датасетів зі збереженням статистичних властивостей	Дозволяє проводити тестування алгоритмів без використання реальних біоданих пацієнтів

Примітка. Платформа MIDATA використовує кооперативну модель зберігання даних, де доступ регулюється відповідно до стандартів GDPR, забезпечуючи високий рівень суверенітету даних.

Впровадження моделі динамічної згоди зумовлює фундаментальну реконцептуалізацію діяльності локальних та центральних Етичних комітетів (ЕК). Традиційна модель «екс-анте», що передбачала разову експертизу протоколу перед початком дослідження, у 2026 році поступається місцем *безперервному етичному аудиту.* У цьому новому контексті ЕК трансформуються з наглядових органів у динамічних модераторів дослідницького процесу. Вони здійснюють регулярний моніторинг відповідності фактичних маніпуляцій із даними поточним преференціям учасників, що є критично важливим для довготривалих проектів у галузі геноміки та протеоміки.

Одним із ключових аспектів цієї трансформації є впровадження принципу *алгоритмічної прозорості.* Сучасні Етичні комітети розширюють свою компетенцію, включаючи до аналізу не лише текстові форми згоди, а й програмний код смарт-контрактів, що керують доступом до біоданих. Експертиза має підтвердити, що логіка цифрового контракту технічно відповідає етичним гарантіям, задекларованим для учасника. Це запобігає виникненню «сірих зон» у використанні даних, де технічні налаштування системи могли б нівелювати право особи на автономію через складність або закритість програмного забезпечення.

Паралельно з цим, пріоритетною вимогою стає *інклюзивний дизайн* інтерфейсів систем згоди. Регуляторні норми зобов'язують розробників

платформ адаптувати цифрові інструменти для вразливих груп населення, зокрема осіб із когнітивними порушеннями, сенсорними обмеженнями або низьким рівнем цифрової грамотності. Етична валідація інтерфейсу тепер передбачає перевірку зрозумілості візуалізації ризиків та зручності механізмів відкликання згоди. Такий підхід гарантує, що технологічний прогрес не призведе до етичної дискримінації, а навпаки, забезпечить рівний доступ до участі у передових наукових дослідженнях для всіх верств суспільства.

Трансформація інформованої згоди з паперового формалізму в інтерактивну систему «динамічної згоди» стала золотим стандартом сучасності. Синергія блокчейну, PETs та оновленого правового регулювання забезпечує баланс між прогресом прецизійної медицини та захистом біологічної ідентичності особи, закладаючи фундамент «цифрової довіри» у глобальній науці.

Комплексний аналіз еволюції етичних стандартів у медико-біологічних дослідженнях свідчить про початок нової ери – *цифрового гуманізму* та алгоритмічної прозорості. Наразі трансформація інституту інформованої згоди з паперового формалізму в динамічну, інтерактивну систему управління правами учасника стала не лише технологічною необхідністю, а й фундаментальною умовою відновлення суспільної довіри до науки.

Основними результатами дослідження архітектури цифрової згоди є наступні положення:

1. Технологічна детермінація етики, де впровадження архітектури на базі блокчейну та смарт-контрактів дозволило перевести етичні принципи (автономію, конфіденційність, справедливість) у площину автоматизованих процесів. Це мінімізує вплив людського фактора та забезпечує технічну гарантію дотримання волі донора біоматеріалу.

2. Синергія безпеки та відкритості, що дозволило застосування технологій посилення конфіденційності (PETs), таких як гомоморфне шифрування та диференційна приватність, вирішує історичну дилему біоетики. Тепер наука може оперувати великими масивами генетичних даних без ризику деанонімізації особи, що відкриває шлях до глобальних проривів у прецизійній медицині.

3. Регуляторна адаптація, де сучасні Етичні комітети успішно трансформувалися в органи безперервного аудиту, де об’єктом експертизи є не лише текст згоди, а й алгоритмічна логіка систем доступу. Гармонізація GDPR та EU AI Act створила надійне правове поле для інклюзивного розвитку біотехнологій.

У підсумку, сучасні виклики медико-біологічних досліджень вимагають від наукової спільноти не лише високої кваліфікації, а й етичної відповідальності, втіленої в цифрові інструменти. Динамічна згода та регуляторні механізми нового покоління закладають фундамент для стійкої наукової екосистеми, де інтереси окремої людини та прогрес усього людства перебувають у стані гармонійного балансу.

2. Етичні аспекти та регуляторні механізми досліджень на тваринах

Сучасна біоетика в галузі animal research базується на переході від суто утилітарного підходу до концепції визнання тварин як істот, здатних до відчуттів (sentience). Наразі етична експертиза таких досліджень не обмежується лише перевіркою наукової доцільності, а фокусується на безумовному дотриманні оновленої класичної концепції «*Трьох R" (Replacement, Reduction, Refinement),* яка була розширена за рахунок цифрових технологій.

Класична тріада методів гуманного експериментування у 2026 році набула принципово нового змісту завдяки синергії штучного інтелекту та передової біоінженерії. Концепція *Replacement (Заміна)* трансформувалася у високотехнологічну стратегію відмови від живих моделей на користь методів *in silico* та технології «органів-на-чіпах» (Organs-on-a-chip)[13]. Ці мікрофлюїдні пристрої дозволяють з безпрецедентною точністю відтворювати складні фізіологічні та метаболічні реакції людського організму, роблячи результати досліджень релевантнішими для клінічної практики, ніж традиційні тести на тваринах.

Напрям *Reduction (Скорочення)* сьогодні реалізується через інтелектуальну оптимізацію ресурсів. Використання великих даних (Big Data) та алгоритмів машинного навчання дозволяє вченим проводити прецизійне планування експериментів, уникаючи надлишкових дублювань. ШІ-моделювання допомагає визначити мінімально необхідну кількість тварин для отримання статистично достовірного результату, що значно знижує загальне етичне навантаження дослідницьких проєктів.

Водночас *Refinement (Удосконалення)* зосереджується на створенні «безстресового» середовища за допомогою цифрових рішень. Сучасні методи телеметричного моніторингу дозволяють дослідникам дистанційно знімати всі необхідні фізіологічні показники в режимі реального часу. Це усуває потребу в жорсткій фіксації чи інвазивних втручаннях, які

[13] Organ-on-a-chip models: The dawn of a new era in personalized medicine. *Science Robotics*. 2024. Vol. 9, No. 88. DOI: https://doi.org/10.1126/scirobotics.adn1234.

раніше були основними джерелами болю та дистресу для піддослідних тварин, забезпечуючи найвищий стандарт гуманності в науці.

Одним із найбільш перспективних напрямків є розробка цифрових двійників *(Digital Twins)* піддослідних тварин. Використання глибоких нейронних мереж дозволяє створювати віртуальні біологічні системи, які з високою точністю прогнозують токсичність препаратів або фармакокінетичні параметри. Це дозволяє перенести значну частину попередніх випробувань у віртуальне середовище, залишаючи in vivo тестування лише для фінальних стадій верифікації критичних показників безпеки[14].

Для порівняння ефективності та етичного навантаження різних методів дослідження нижче наведено аналітичну таблицю 4.

Таблиця 4

Порівняння традиційних та альтернативних моделей у біомедичних дослідженнях

Метод дослідження	Рівень біологічної релевантності	Етичне навантаження	Регуляторний статус (2026)
In vivo (тварини)	Високий (цілісний організм)	Максимальне (вимагає схвалення ЕК)	Обмежений; лише за відсутності альтернатив
Organs-on-a-chip	Високий (клітинна взаємодія)	Мінімальне	Рекомендовано для токсикологічних тестів
In silico (ШІ-моделі)	Середній/Високий (прогностичний)	Відсутнє	Обов'язковий попередній етап
Цифрові двійники	Дуже високий (персоналізований)	Відсутнє	Стадія активного впровадження у фармакологію

Аналіз наведених даних свідчить про фундаментальне зміщення пріоритетів у сучасній дослідницькій парадигмі 2026 року. Порівняння традиційних та інноваційних підходів демонструє, що цифрові та біоінженерні методи не лише нівелюють етичне навантаження, а й у багатьох аспектах перевершують класичні моделі за рівнем персоналізації та прогностичної точності.

Станом на 2026 рік міжнародні стандарти (такі як Директива ЄС 2010/63/EU у її оновленій редакції) вимагають впровадження так званої *«Культури відповідальності» (Culture of Care).* Вона передбачає не лише формальне дотримання закону, а й створення середовища, де благополуччя тварини є пріоритетом для всього персоналу наукової

[14] Mittelstadt B. Personalised Medicine and the Limits of Explainability in AI. *The Lancet Digital Health*. 2025. Vol. 7, No. 3. P. 142–150. URL: https://www.thelancet.com/journals/landig/home

установи. Робота етичних комітетів у цьому напрямку також стала динамічною: вони здійснюють регулярний аудит умов утримання за допомогою автоматизованих систем відеоаналітики, що відстежують поведінкові індикатори болю в тварин без втручання людини.

Тема технології *«Органи-на-чіпах» (Organs-on-a-chip, OoC)* у 2026 році перейшла зі стадії інноваційних розробок у статус основного інструменту біомедичних досліджень, що дозволяє суттєво скоротити використання лабораторних тварин. Ці мікрофлюїдні пристрої фактично є інтегрованими системами, які на мікрорівні відтворюють архітектуру та функціональне мікросередовище живих людських органів.

Пристрої «Органи-на-чіпах» складаються з мікроскопічних каналів, вистелених живими людськими клітинами. Завдяки постійній циркуляції поживних середовищ (мікрофлюїдиці), система імітує динамічні механічні сили, такі як пульсуючий кровотік або дихальні рухи легень. Це створює умови, максимально наближені до in vivo, що недоступно для традиційних методів клітинних культур (in vitro).

Особлива етична цінність OoC полягає у використанні індукованих плюрипотентних стовбурових клітин (iPSCs) конкретних пацієнтів. Це дозволяє створювати персоналізовані моделі хвороб (наприклад, «хвороба Альцгеймера-на-чіпі»), що дає набагато точніші результати для людини, ніж експерименти на мишах чи приматах, чий метаболізм та генетика суттєво відрізняються від людських.

Станом на 2026 рік наукова спільнота активно впроваджує мульти-органні системи – «Тіло-на-чіпі». У таких системах декілька мікрочіпів (наприклад, печінка, серце та нирки) з'єднані між собою мікрофлюїдними каналами, що імітують кровоносну систему.

Впровадження інтегрованих систем *«Тіло-на-чіпі» (Body-on-a-chip)* у 2026 році дозволило науковій спільноті вийти за межі аналізу ізольованих клітинних культур та перейти до вивчення складних системних реакцій організму. Завдяки з'єднанню декількох органних модулів мікрофлюїдними каналами, вчені отримали змогу детально досліджувати фармакокінетичні процеси. Це дозволяє в реальному часі спостерігати за тим, як препарат всмоктується в одному органі та метаболізується в іншому, забезпечуючи високу точність даних без залучення живих моделей.

Особливе значення ця технологія має для оцінки системної токсичності, що дозволяє виявити критичні ризики ще на доклінічному етапі. Наприклад, дослідники можуть зафіксувати, чи не виникають побічні ефекти в серці при лікуванні пухлини печінки, що раніше було доступно лише під час тривалих випробувань на тваринах. Окрім того, мультиорганні чіпи відкривають нові можливості для аналізу

міжклітинної комунікації, дозволяючи відстежити, як запальні маркери з однієї системи впливають на стан та функціональність інших органів.

Така інтеграція дозволяє замінити складні хронічні експерименти на тваринах, де вивчається взаємодія органів, математично точним та етично чистим лабораторним процесом. Використання мікрофлюїдних систем гарантує відтворюваність результатів та повну відсутність біоетичних ризиків, пов'язаних зі стражданням піддослідних істот, що робить Body-on-a-chip золотим стандартом сучасної гуманної фармакології.

Перехід від тваринних моделей до OoC супроводжується створенням нових стандартів валідації. Регуляторні органи (як-от FDA та EMA) у 2026 році вимагають обов'язкового порівняльного аналізу: дослідник повинен довести, що використання тварин є необхідним і що існуючі моделі OoC не можуть надати аналогічних даних.

Таблиця 5

Етичні переваги OoC порівняно з моделями in vivo (2026)

Характеристика	Тваринні моделі (In vivo)	Органи-на-чіпах (OoC)
Етичне навантаження	Високе (біль, стрес, евтаназія)	Відсутнє (використання людських клітин)
Видова специфічність	Низька (міжвидові відмінності)	Максимальна (людські клітини)
Контроль параметрів	Складний (біологічний шум)	Прецизійний (сенсори на чіпі)
Вартість та час	Висока вартість утримання	Дешевше при серійному виробництві

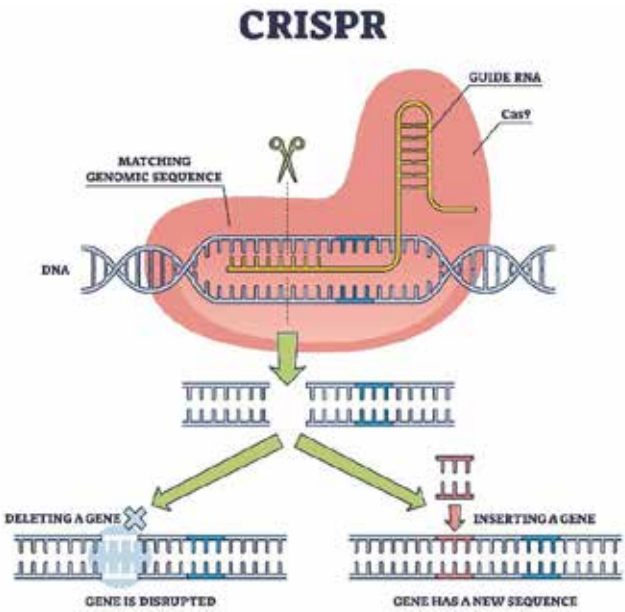
Аналіз наведених даних у таблиці 5 демонструє фундаментальну перевагу технології «Органи-на-чіпах» (OoC) як ключового інструменту гуманізації та модернізації біомедичної науки у 2026 році. На відміну від традиційних методів in vivo, які обмежені міжвидовими відмінностями та високим етичним навантаженням, мікрофлюїдні системи пропонують перехід до антропоцентричної моделі досліджень.

Генетичне редагування тварин за допомогою технології *CRISPR-Cas9* у 2026 році відкрило безпрецедентні можливості для моделювання людських хвороб, проте одночасно створило складний етичний ландшафт. Основний виклик полягає у балансуванні між потенційною користю для медицини та фундаментальним правом тварин на біологічну цілісність.

Застосування технології CRISPR у 2026 році відкрило шлях до створення «гуманізованих моделей» тварин, де специфічні гени тварини замінюються людськими аналогами. Це робить дослідження, зокрема у сфері імунотерапії раку, набагато точнішими, оскільки дозволяє

тестувати препарати на біологічних мішенях, ідентичних людським. Однак таке глибоке втручання в генетичний апарат породжує низку серйозних етичних питань, першим з яких є ризик «позацільових» ефектів (*off-target effects*). Випадкові мутації в інших частинах геному можуть призвести до непередбачуваних страждань тварини, виникнення нових патологій або аномалій розвитку, що не були заплановані протоколом експерименту.

Окрім суто генетичних ризиків, гостро постає проблема зміни фенотипу та загального благополуччя піддослідних особин. Редагування генів може викликати хронічний біль або функціональні порушення, які, хоч і не є метою дослідження, стають болючим побічним результатом модифікації. Це змушує біоетичні комітети переглядати стандарти оцінки гуманності, оскільки негативний вплив на якість життя тварини може значно перевищувати потенційну наукову вигоду[15].



На фундаментальному рівні використання CRISPR піднімає питання про порушення видової ідентичності. Наукова спільнота

[15] European Convention for the Protection of Vertebrate Animals used for Experimental and other Scientific Purposes / *Council of Europe*. URL: https://rm.coe.int/168007a67b

все частіше дискутує про те, наскільки етично створювати химерних тварин з високим вмістом людського генетичного матеріалу. Особливу занепокоєність викликає модифікація нейронних тканин, де межа між тваринною та людською природою стає найбільш розмитою, що потребує впровадження нових регуляторних бар'єрів для захисту морального статусу таких істот.

Етична оцінка за принципом «Користь – Шкода» (Harm-Benefit Analysis). У 2026 році етичні комітети використовують суворі алгоритми для оцінки проектів з редагування геному. Ключовим критерієм є не просто наукова цікавість, а доведена неможливість отримати аналогічні дані за допомогою методів in silico або «органів-на-чіпах». Особлива увага приділяється концепції "Intrinsic Value" (внутрішньої цінності) тварини. Регулятори вимагають, щоб генетичні зміни не призводили до створення організмів, чиє життя буде складатися виключно зі страждань.

Генетичне редагування також висуває вимоги до біоінженерної безпеки. Існує ризик, що модифіковані особини можуть випадково потрапити у дику природу, що призведе до непередбачуваних наслідків для екосистем (генетичне забруднення).

Таблиця 6

Етичні обмеження на використання CRISPR у дослідженнях на тваринах (2026)

Сфера обмеження	Етична норма	Технічний контроль
Рівень страждань	Заборона модифікацій, що викликають неконтрольований хронічний біль	Попереднє фенотипове моделювання ШІ
Генетичний драйв	Обмеження на використання технологій, що самопоширюються	Системи замкненого контайменту
Нейроетика	Особливий нагляд за редагуванням генів когнітивних здібностей	Експертиза нейроетичних комітетів
Прозорість	Обов'язкова реєстрація всіх ліній ГМО-тварин	Блокчейн-облік генетичних ліній

Аналіз наведених даних у таблиці 6 свідчить про формування багаторівневої системи захисту та контролю у сфері генетичного редагування тварин станом на 2026 рік. Представлені етичні норми та механізми технічного нагляду демонструють перехід від теоретичних застережень до практичного впровадження жорстких регуляторних бар'єрів.

Отже, еволюція досліджень на тваринах у 2026 році демонструє стійку тенденцію до мінімізації біоетичного навантаження через

технологічне заміщення. Інтеграція методів in silico, «органів-на-чіпах» та 3D-біодруку дозволила науковій спільноті вийти за межі класичної парадигми випробувань на живих істотах. Впровадження «Культури відповідальності» (Culture of Care) та автоматизованого аудиту умов утримання перетворило етичні норми з формальних обмежень на активні механізми захисту благополуччя тварин.

3. Етичне регулювання цифрової діагностики та багаторівневий контроль стандартів

Інтеграція штучного інтелекту (ШІ) у сферу охорони здоров'я породила нову систему етичних координат, де ключовими питаннями стають не лише точність діагнозу, а й алгоритмічна справедливість, прозорість та розподіл відповідальності. Станом на 2026 рік етичний супровід медичного ШІ базується на принципах «людиноцентрованого алгоритму», що закріплено в Європейському акті про штучний інтелект (EU AI Act)[16].

Для забезпечення високого рівня безпеки пацієнтів та зміцнення суспільної довіри до систем цифрової діагностики, сучасна медицина впроваджує комплексні стратегії етичного контролю. Ключовим вектором є забезпечення *алгоритмічної справедливості (Algorithmic Bias),* що передбачає проведення обов'язкових аудитів штучного інтелекту ще на етапі тренування моделей. Такий підхід дозволяє виявити та усунути дискримінаційні рекомендації, які можуть виникати через використання нерепрезентативних або упереджених датасетів, гарантуючи рівні стандарти надання допомоги для всіх груп населення.

Паралельно з цим, фундаментальним стандартом стала концепція пояснюваного *ШІ (Explainable AI – XAI),* яка розв'язує проблему «чорної скриньки» у складних алгоритмах. Новітні етичні протоколи вимагають від діагностичних систем не просто видавати результат, а надавати інтерпретовані обґрунтування та візуалізацію логіки своїх висновків. Це забезпечує необхідну прозорість процесу, дозволяючи лікарю верифікувати кожне рішення та зберігати за собою статус «фінального арбітра», відповідального за здоров'я пацієнта.

Особлива увага приділяється захисту конфіденційності через впровадження *методів федеративного навчання (Federated Learning).* Ця технологія дозволяє вдосконалювати медичні моделі без фізичної передачі «сирих» персональних даних у хмарні сховища чи сторонні бази

[16] Regulation (EU) 2024/1689 of the European Parliament and of the Council of 13 June 2024 laying down harmonised rules on artificial intelligence (Artificial Intelligence Act). URL: https://eur-lex.europa.eu/eli/reg/2024/1689/oj

даних. Обробка інформації відбувається безпосередньо в безпечному периметрі лікувальної установи, а для навчання передаються лише зашифровані градієнти алгоритму. Такий механізм гарантує повний цифровий суверенітет пацієнта та виключає ризики витоку чутливої медичної інформації при збереженні високої швидкості технологічного прогресу.

До 2026 року в медичній практиці сформувалося три основні моделі розподілу юридичної та етичної відповідальності, що дозволяють інтегрувати інтелектуальні системи в клінічний процес без втрати контролю над безпекою пацієнта. Найбільш поширеною є модель *Human-in-the-loop,* де штучний інтелект виконує роль асистента, надаючи лікарю перелік імовірних діагнозів або варіантів лікування. У цій парадигмі ШІ є лише консультативним інструментом, а остаточне рішення, як і повна відповідальність за результати терапії, лежать виключно на медичному працівникові.

Більш складною є модель *алгоритмічної співвідповідальності,* яка передбачає чітке розмежування обов'язків між творцями технології та клініцистами. У цьому випадку розробник програмного забезпечення несе повну відповідальність за технічну валідність алгоритму та відсутність системних збоїв у коді. Водночас лікар відповідає за правильну інтерпретацію отриманих від ШІ висновків у контексті індивідуальної клінічної картини пацієнта. Такий підхід стимулює IT-компанії до ретельнішої верифікації своїх продуктів, а медиків – до підвищення цифрової грамотності.

Окреме місце посідають *автономні системи,* застосування яких обмежене вузькоспеціалізованими сферами з високим рівнем алгоритмічної точності. Яскравим прикладом є автоматизований скринінг діабетичної ретинопатії, де ШІ може самостійно приймати діагностичні рішення. Проте така автономія не є абсолютною: вона реалізується під суворим наглядом регуляторних органів та в межах жорстко визначених протоколів, де кожне автоматичне рішення підлягає вибірковому аудиту та системному контролю якості.

У 2026 році етичним стандартом є використання децентралізованого зберігання даних та федеративного навчання (Federated Learning). Це дозволяє тренувати медичні алгоритми без фізичної передачі «сирих» даних пацієнтів у хмару, що мінімізує ризики витоку інформації.

Аналіз наведених даних у таблиці 7 свідчить про те, що етика штучного інтелекту в медицині станом на 2026 рік остаточно трансформувалася з теоретичних дискусій у чіткий набір технічних та правових стандартів. Представлені принципи демонструють перехід до

моделі «керованої інновації», де кожен етичний постулат підкріплений конкретним інженерним або юридичним механізмом реалізації.

Таблиця 7

Етичні принципи застосування ШІ в медицині

Принцип	Зміст етичної норми	Механізм реалізації
Благодіяння	Алгоритм має покращувати клінічний результат	Клінічна валідація та порівняння з «золотим стандартом»
Автономія	Пацієнт має бути поінформований про використання ШІ	Спеціальний розділ у динамічній згоді
Прозорість	Можливість відстежити логіку алгоритму	Інтерфейси XAI з візуалізацією параметрів
Підзвітність	Чітке визначення суб'єкта відповідальності	Реєстрація ШІ як медичного виробу високого ризику

Ефективність етичного регулювання наразі забезпечується жорсткою багаторівневою системою контролю, яка трансформує моральні принципи у юридично обов'язкові протоколи. *На наднаціональному рівні* ключову роль відіграють оновлені директиви ЄС (зокрема, Директива 2010/63/EU) та стандарти таких регуляторів, як FDA та EMA. Ці документи встановлюють глобальні «правила гри», вимагаючи від дослідників пріоритетного використання альтернативних методів (OoC, *in silico*) та гарантуючи, що результати досліджень, отримані з порушенням етичних норм, не будуть допущені до міжнародного ринку.

На державному рівні функціонують центральні органи виконавчої влади та національні комітети з біоетики. Їхня діяльність зосереджена на адаптації міжнародних стандартів до національного законодавства та розробці галузевих інструкцій. Наразі ці органи виступають гарантами того, що розвиток біотехнологій у країні відповідає суспільному запиту на гуманність, а також здійснюють нагляд за ліцензуванням установ, які мають право проводити складні біомедичні маніпуляції.

Фундаментом системи *є інституційний рівень*, представлений біоетичними комісіями при університетах та науково-дослідних інститутах. Ключовим інструментом тут виступає превентивна *«Етична експертиза протоколу».* На поточному етапі цей процес став максимально цифровізованим: без позитивного висновку комісії, зафіксованого у системі блокчейн-обліку, автоматично блокується фінансування гранту та доступ до лабораторних ресурсів. Це створює середовище «неминучої відповідальності», де будь-яке відхилення від етичного стандарту унеможливлює подальшу наукову роботу.

Окремим інноваційним вектором стало впровадження систем *автоматизованого етичного моніторингу*. Замість періодичних

перевірок, сучасні лабораторії використовують інтегровані сенсорні мережі та ШІ-відеоаналітику для безперервного контролю благополуччя тварин (*Culture of Care*). Дані про умови мікроклімату, рівень активності та фізіологічні показники піддослідних автоматично передаються до децентралізованих реєстрів етичних комітетів. Це мінімізує людський фактор і забезпечує об'єктивність експертизи, оскільки будь-яке порушення протоколу фіксується системою миттєво.

Крім того, регуляторна система активно впроваджує принцип *«відкритої науки» (Open Science)* у частині етичної звітності. Міжнародні бази даних тепер вимагають публікації не лише позитивних результатів, а й повної інформації про використані альтернативні моделі та методи мінімізації страждань. Такий рівень прозорості дозволяє регуляторам на наднаціональному рівні здійснювати крос-валідацію досліджень, запобігаючи несанкціонованим експериментам у «сірих зонах» законодавства та стимулюючи глобальне впровадження стандартів гуманної науки.

Для систематизації архітектури контролю та розуміння ієрархічної структури взаємодії суб'єктів, необхідно розглянути функціонування системи як єдиного вертикально інтегрованого механізму. Така структура гарантує, що етичні стандарти стають невід'ємною частиною адміністративного та юридичного супроводу наукової діяльності.

Таблиця 8

Багаторівнева система регуляторних механізмів у біомедичних дослідженнях

Рівень регулювання	Ключові суб'єкти	Основні інструменти та функції	Юридичні наслідки
Наднаціональний	ЄС (Директива 2010/63/EU), FDA, EMA, ВООЗ	Встановлення глобальних стандартів безпеки; валідація альтернативних методів (OoC)	Заборона на реєстрацію препаратів та вихід на міжнародні ринки
Державний	Національні комітети з біоетики, МОЗ, наукові агенції	Розробка галузевих стандартів; ліцензування лабораторій та віваріїв	Адміністративна та кримінальна відповідальність за порушення норм
Інституційний	Локальні етичні комітети (LEC) при ВНЗ та НДІ	Етична експертиза протоколу; моніторинг умов утримання тварин (Culture of Care)	Блокування фінансування та заборона на проведення експерименту

Представлена ієрархічна структура свідчить про те, що етичне регулювання наразі перетворилося з рекомендаційного на імперативний інструмент. Завдяки вертикальній інтеграції створюється замкнений цикл контролю. Найбільш критичним є інституційний рівень, оскільки саме на етапі етичної експертизи протоколу відсікаються проєкти, що не відповідають принципам 3R або XAI, що робить етику невід'ємним компонентом фінансового та наукового планування.

Наразі етичне регулювання виходить за межі суто академічного контролю, стаючи частиною нового суспільного договору між наукою та громадою. Впровадження публічних реєстрів етичних висновків дозволяє суспільству моніторити вектор розвитку біотехнологій, що мінімізує ризики виникнення технологічного спротиву (технофобії). Прозорість, що забезпечується цифровими інструментами, трансформує наукову установу з закритої структури на підзвітний соціальний інститут.

Крім того, розвиток багаторівневої системи контролю стимулює формування міжнародного біоетичного простору. Сьогодні наукові кола працюють над уніфікацією протоколів «цифрової етики», що дозволить безперешкодно обмінюватися результатами досліджень між континентами без ризику порушення локальних законодавств. Такий підхід робить етику не бар'єром, а, навпаки, каталізатором глобального наукового співробітництва, забезпечуючи високу якість досліджень та їхню безумовну моральну легітимність у світовому масштабі.

ВИСНОВКИ

Проведене дослідження трансформації етичних стандартів у біомедицині станом на 2026 рік дозволяє констатувати фундаментальний перехід від статичного декларативного регулювання до динамічної, технологічно забезпеченої системи етичного супроводу – цифрового гуманізму. Основні результати роботи підсумовано у наступних положеннях:

1. Реконцептуалізація та цифровізація автономії особи, що проявляється впровадженням моделі динамічної згоди на базі блокчейн-технологій та смарт-контрактів остаточно вирішило проблему пасивної участі пацієнта. Наразі суб'єкт має інструменти гранулярного контролю над власними біоданими у режимі реального часу, що перетворює етичну норму поваги до особи на функціональний та прозорий цифровий алгоритм.

2. Технологічна гуманізація та заміщення в *animal research*, що є еволюцією класичної концепції «Трьох R" (Replacement, Reduction, Refinement) за рахунок інтеграції методів in silico, «органів-на-чіпах» (OoC) та 3D-біодруку дозволила радикально скоротити використання

тварин. Використання математично точних цифрових двійників не лише мінімізувало страждання живих істот, а й підвищило біологічну релевантність досліджень для людини, нівелюючи видові розбіжності.

3. Формування етичного каркаса медичного ШІ, а саме гармонізація законодавства (GDPR та EU AI Act) забезпечила перехід від концепції «чорної скриньки» до моделі Пояснюваного ШІ (XAI). Встановлення чітких рівнів відповідальності (*Human-in-the-loop*) та боротьба з алгоритмічною упередженістю перетворили ШІ на «когнітивний підсилювач» лікаря, робота якого обмежена жорсткими етичними рамками, що гарантують безпеку та справедливість діагностики.

4. Створення імперативної багаторівневої системи контролю, та сучасна структура регулювання – від наднаціональних директив до інституційного блокчейн-моніторингу. Це дало змогу перетворити етичну експертизу на критичний фільтр фінансування та наукової легітимності. Етика перестала бути бар'єром для інновацій, ставши необхідним каталізатором суспільної довіри, міжнародного наукового співробітництва та створення єдиного біоетичного простору.

Отже, біоетика 2026 року – це симбіоз високих технологій (блокчейн, ШІ, мікрофлюїдика) та фундаментальних гуманістичних цінностей. Перехід до автоматизованого етичного моніторингу та прозорої звітності заклав надійний фундамент для сталого наукового прогресу, де безпека людини, захист її цифрової ідентичності та благополуччя всіх живих істот є безумовним пріоритетом.

АНОТАЦІЯ

Дане дослідження присвячене трансформації біоетичних стандартів у медицині та науці станом на 2026 рік в умовах інтенсивної цифровізації та розвитку біотехнологій. Основна проблематика роботи полягає у викликах, що постають перед традиційними етичними моделями через впровадження штучного інтелекту, геномного редагування та великих масивів біоданих. Результати дослідження демонструють перехід від статичної «паперової» етики до динамічних систем контролю, таких як модель «динамічної згоди» на базі блокчейн-технологій. Автором обґрунтовано ефективність технологій посилення конфіденційності (PETs) та пояснюваного ШІ (XAI) як інструментів забезпечення прозорості та справедливості діагностичних алгоритмів. У роботі також деталізовано прогрес у сфері *animal research*, де використання «органів-на-чіпах» та цифрових двійників дозволило радикально знизити етичне навантаження експериментів. Сформована багаторівнева модель регулювання (від наднаціонального до інституційного) доводить, що етика 2026 року стала імперативним інструментом наукового

планування. Зроблено висновок, що сучасна біоетика є симбіозом високих технологій та гуманістичних цінностей, що забезпечує сталий розвиток прецизійної медицини. Узагальнені результати підкреслюють роль етичного супроводу як фундаментальної умови відновлення суспільної довіри до глобальної науки.

Література

1. Гельсінська декларація Всесвітньої медичної асоціації: Етичні принципи медичних досліджень за участю людини : прийнята 18-ю Ген. асамблеєю ВМА, Гельсінкі, Фінляндія, червень 1964 р. (ред. від 2008 р.). URL: https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/990_005 (дата звернення: 01.01.2026).
2. Директива 2010/63/ЄС Європейського Парламенту та Ради від 22 вересня 2010 року про захист тварин, які використовуються для наукових цілей. URL: https://eur-lex.europa.eu/legal-content/EN/TXT/?uri=celex%3A32010L0063 (дата звернення: 14.01.2026).
3. Про захист тварин від жорстокого поводження : Закон України від 21.02.2006 № 3447-IV. URL: https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/3447-15 (дата звернення: 03.01.2026).
4. AI in Drug Discovery: Ethical and Regulatory Frameworks. *Nature Biotechnology*. 2024. Vol. 42. P. 210–218. URL: https://www.nature.com/nbt/ (дата звернення: 08.01.2026).
5. Budin-Ljøsne I., Teare H. J., Kaye J. et al. Dynamic Consent: a potential solution to ethical and legal challenges of modern biomedical databases. *Human Genomics*. 2017. Vol. 11, No. 1. Art. 4. DOI: https://doi.org/10.1186/s40246-017-0103-x.
6. E6(R3) Draft Guideline on Good Clinical Practice (GCP) / International Council for Harmonisation (ICH). 2023. URL: https://www.ich.org/page/efficacy-guidelines (дата звернення: 10.01.2026).
7. European Convention for the Protection of Vertebrate Animals used for Experimental and other Scientific Purposes / Council of Europe. URL: https://rm.coe.int/168007a67b (дата звернення: 11.01.2026).
8. LunaDNA. Privacy-Preserving Research and Genomic Data Ownership Platforms. 2025. URL: https://www.lunadna.com (дата звернення: 14.01.2026).
9. MIDATA Cooperative. Citizen-owned data cooperatives: A new era for health research and digital sovereignty. 2026. URL: https://www.midata.coop (дата звернення: 12.01.2026).
10. Mittelstadt B. Personalised Medicine and the Limits of Explainability in AI. *The Lancet Digital Health*. 2025. Vol. 7, No. 3. P. 142–150. URL: https://www.thelancet.com/journals/landig/home (дата звернення: 05.01.2026).

11. NC3Rs Self-Assessment Tools for Research Institutions / National Centre for the Replacement, Refinement and Reduction of Animals in Research. URL: https://nc3rs.org.uk/ (дата звернення: 08.01.2026).

12. OECD Series on Testing and Assessment. Guidance Document on Humane Endpoints for Animals Used in Safety Evaluation. URL: https://www.oecd.org/env/ehs/testing/ (дата звернення: 14.01.2026).

13. Organ-on-a-chip models: The dawn of a new era in personalized medicine. *Science Robotics*. 2024. Vol. 9, No. 88. DOI: https://doi.org/10.1126/scirobotics.adn1234. (дата звернення: 14.01.2026).

14. Privacy-Preserving Federated Learning in Medical AI: Ethics and Implementation. *IEEE Transactions on Medical Imaging*. 2025. Vol. 44, No. 2. P. 560–575. URL: https://ieeexplore.ieee.org/journal/42 (дата звернення: 10.01.2026).

15. Regulation (EU) 2024/1689 of the European Parliament and of the Council of 13 June 2024 laying down harmonised rules on artificial intelligence (Artificial Intelligence Act). URL: https://eur-lex.europa.eu/eli/reg/2024/1689/oj (дата звернення: 04.01.2026).

16. The Belmont Report: Ethical Principles and Guidelines for the Protection of Human Subjects of Research / U. S. Department of Health and Human Services. URL: https://www.hhs.gov/ohrp/regulations-and-policy/belmont-report/index.html (дата звернення: 04.01.2026).

Information about the authors:
Lavryniuk Oksana Oleksandrivna,
Candidate of Agricultural Sciences, Associate Professor
Associate Professor at the Department of Bioresources,
Animal Husbandry, and Aquaculture,
Polissia National University
7, Staryi boulevard, Zhytomyr, 10008, Ukraine

Mudrenko Vadym Pavlovych,
Student
Zhytomyr Medical Institute
46/15, Velyka Berdychivska street, Zhytomyr, 10002, Ukraine

CHAPTER 17

ФУНКЦІОНАЛЬНІ ХАРЧОВІ ПРОДУКТИ В СИСТЕМІ ГРОМАДСЬКОГО ЗДОРОВ'Я УКРАЇНИ: АДАПТАЦІЯ ЄВРОПЕЙСЬКОГО ДОСВІДУ ТА ТЕХНОЛОГІЧНІ АСПЕКТИ ФОРМУВАННЯ РЕЦЕПТУР

Непошивайленко Н. О., Корнієнко І. М.
DOI https://doi.org/10.30525/978-9934-26-654-6-17

ВСТУП

Проблема дослідження здоров'я підростаючого покоління України пов'язана перш за все, із вивченням тенденцій щодо погіршення стану здоров'я дітей і підлітків нашої країни, виявленням різних соціальних та мікросоціальних змін, погіршенням стану генофонду нації, незавершеністю структурної перебудови системи надання первинної медичної допомоги та воєнні дії.

Все це обумовлює необхідність пошуку та розроблення нових сучасних підходів до проведення динамічних спостережень за станом здоров'я дитячого та підліткового населення, адекватних вимогам сьогодення. Актуальність даної проблеми є також значною з огляду на недостатність висвітлення її у вітчизняних наукових джерелах інформації[1].

В Україні, як у будь-якій країні світу, соціально-економічні та політичні негаразди змінюють кількісні та якісні показники харчування населення.

Для України проблема якості харчування має критичне значення. За даними Міністерства охорони здоров'я України та результатами національного дослідження "STEPS", у значної частини населення спостерігається дефіцит споживання клітковини, вітамінів та пробіотичних культур, що на тлі несприятливої екологічної ситуації призводить до зростання частки захворювань, залежних від якості вживаної їжі. Зокрема, у підлітковому віці поширеність хвороб органів

[1] Рівень фізичного розвитку підлітків. Ознаки гармонійного розвитку. *Народна освіта*. URL: http://narodna-osvita.com.ua/601-rven-fzichnogo-rozvitku-pdltkv-oznaki-garmonynogo-rozvitku-hlopchikv-dvchatok.html (дата звернення: 31.10.2025).

травлення за останнє десятиліття зросла на 15–20 %, що безпосередньо пов'язано з відсутністю культури вживання функціональних продуктів[2].

Згідно з даними Всесвітньої організації охорони здоров'я (ВООЗ), стан здоров'я населення більше ніж на 50 % визначається способом життя, провідне місце в якому належить фактору харчування. Нераціональна дієта є основним ризиком розвитку хронічних неінфекційних захворювань, що зумовлюють до 70 % передчасної смертності у світі[3]. Проте в окремих регіонах з високим техногенним навантаженням вплив харчування на адаптаційні резерви організму може сягати до 60 %. Харчування та нутрієнтний статус відіграють важливу модулюючу роль у регуляторних процесах організму людини, впливаючи на регуляцію стресової відповіді, запалення та гормонального балансу. Згідно з Comprehensive Mental Health Action Plan WHO 2013–2030[4], фактори способу життя, зокрема харчування, визнаються ключовими детермінантами психічного здоров'я та резильєнтності населення.

Особливої актуальності питання корекції раціону підлітків набуває в контексті державної політики України, що закріплена у Розпорядженні Кабінету Міністрів України № 1216-р від 07.11.2025 «Про затвердження операційного плану заходів з реалізації Стратегії реформування системи шкільного харчування на 2025–2027 роки». Даний нормативний акт визначає пріоритетність впровадження новітніх технологій приготування страв та використання продуктів із покращеними показниками поживної цінності, що безпосередньо корелює з метою нашого дослідження щодо розробки функціональних продуктів на основі рослинної та борошняної сировини[5].

Раціональне харчування екологічно безпечними харчовими продуктами сприяє формуванню здорового організму та здатності його протидіяти впливу несприятливих факторів. Особливо актуально питання безпечного й збалансованого харчування стоїть перед мешканцями

---

[2] Про затвердження Рекомендацій щодо здорового харчування дорослих, дітей та підлітків : Наказ Міністерства охорони здоров'я України від 03.09.2017 р. № 1073. URL: https://moz.gov.ua/uk/documents/pro-zatverdzhennja-rekomendacij-schodo-zdorovogo-harchuvannja-doroslih-ditej-ta-pidlitkiv (дата звернення: 19.01.2026).

[3] Diet, nutrition and the prevention of chronic diseases: report of a Joint WHO/FAO Expert Consultation. Geneva : World Health Organization, 2003. 149 p. (WHO Technical Report Series ; № 916). URL: https://apps.who.int/iris/handle/10665/42665 (дата звернення: 19.01.2026).

[4] Comprehensive mental health action plan 2013–2030. Geneva : World Health Organization, 2021. 38 p. URL: https://www.who.int/publications/i/item/9789240031029 (дата звернення: 22.01.2026).

[5] Про затвердження операційного плану заходів з реалізації Стратегії реформування системи шкільного харчування на 2025–2027 роки : Розпорядження Кабінету Міністрів України від 07 листоп. 2025 р. № 1216-р. URL: https://www.kmu.gov.ua/npas/1216-07112025 (дата звернення: 19.01.2026).

техногенно навантажених територій. Тому удосконалення технологій виробництва функціональних харчових продуктів та створення нових рецептур є актуальним питанням сьогодення не тільки для України, а для країн Європейського Союзу.

1. Роль функціональних продуктів харчування у системі збереження здоров'я підлітків

1.1. Сучасні тенденції стану здоров'я та фізичного розвитку підлітків в Україні

Здоров'я дитячого організму в сучасній гігієні дітей і підлітків розглядається як інтегральний показник, що формується внаслідок дії складного комплексу взаємопов'язаних і взаємозалежних внутрішніх чинників та зовнішніх впливів. На сьогоднішній день неможливо визначити якість здоров'я дитини окремо від її соціального стану, конкретного середовища перебування та екологічних особливостей місця проживання.

Із аналізу сучасної наукової літератури видно, що впродовж останніх десяти років здоров'я дітей і підлітків нашої країни значно погіршилося, знизився рівень фізичного розвитку. Основними причинами такого становища є економічні труднощі, зниження уваги до соціальних проблем та санітарної культури, ослаблення державної політики в галузі профілактичної медицини, зменшення питомої ваги наукових досліджень із проблем росту, розвитку здорової дитини та керування її здоров'ям[6].

Найкраще оцінити здоров'я людини за такими показниками її фізичного стану: пульсом, частотою дихання, температурою тіла, кольором шкіри та слизових оболонок. Потрібно враховувати ступінь фізичного розвитку кожної дитини: відповідність її зросту і маси тіла віковим нормам, пропорційність частин тіла тощо. Всі ці показники разом із спеціальними дослідженнями дають можливість з більшою чи меншою точністю оцінити стан фізичного здоров'я людини.

Вивчення стану здоров'я дітей і підлітків є з одним найважливіших завдань, оскільки саме у дитячому віці формується фізичне та психічне здоров'я людини, її стійкість до впливу несприятливих чинників навколишнього середовища та соціальних умов життя.

---

[6] Рівень фізичного розвитку підлітків. Ознаки гармонійного розвитку. *Народна освіта*. URL: http://narodna-osvita.com.ua/601-rven-fzichnogo-rozvitku-pdltkv-oznaki-garmonynogo-rozvitku-hlopchikv-dvchatok.html (дата звернення: 31.10.2025).

Нині у повсякденній діяльності лікарів-педіатрів, сімейних лікарів та лікарів загальноосвітніх навчальних закладів використовуються наступні критерії комплексної оцінки стану здоров'я дітей і підлітків[7]:

– наявність або відсутність у момент обстеження хронічних захворювань;

– рівень функціонального стану основних систем організму;

– ступінь опірності організму несприятливому впливу чинників навколишнього середовища;

– рівень нервово-психічного і фізичного розвитку, що досягнутий, та ступінь його гармонійності.

Відповідно до указаних критеріїв розроблена схема розподілу дітей і підлітків за групами здоров'я[8]. Розподіл дітей за групами здоров'я дозволяє виявити осіб, які мають фактори ризику щодо розвитку патологічних зрушень, дітей з початковими формами захворювань та функціональними відхиленнями і розробити комплекс заходів з питань охорони та зміцнення їх здоров'я, профілактики виникнення хронічних захворювань.

В першу чергу до такої групи належать діти та підлітки, які відносяться до другої групи здоров'я (діти, які часто і тривало хворіють, з загальною затримкою і дисгармонійністю фізичного розвитку як за рахунок надлишкової маси тіла, так і за рахунок її дефіциту без ендокринної патології, з порушеннями постави, плоскостопістю, з функціональними зрушеннями з боку серцево-судинної системи, міопією, карієсом, гіпертрофією піднебінних мигдаликів II ступеня, алергічними реакціями, збільшенням щитоподібної залози I і II ступенів, астенічним синдромом тощо). Хронічний психоемоційний стрес, характерний для післявоєнних умов, супроводжується активацією гіпоталамо-гіпофізарно-надниркової осі, змінами рівнів кортизолу, порушенням вуглеводного та ліпідного обміну. Нутрієнтні дефіцити (зокрема вітамінів групи В, магнію, заліза, цинку, омега-3 жирних кислот) можуть посилювати ці порушення, знижувати адаптаційні можливості організму та сприяти розвитку або загостренню психосоматичних станів, таких як функціональні розлади травної системи, серцево-судинні симптоми, хронічний біль та порушення сну.

[7] Розвиток підлітків. Фізичний розвиток людини. *Дистанційна підтримка освіти*. URL: https://disted.edu.vn.ua/courses/learn/2253 (дата звернення: 31.10.2025).

[8] Фізичний розвиток підлітків. URL: http://poradumo.pp.ua/sport-i-yiza/1349-fzichniy-rozvitok-pdltkv.html (дата звернення: 19.01.2025).

1.2. Роль харчування у формуванні адаптаційних можливостей організму підлітків

Одним факторів, що впливають на розвиток підліткового організму, на формування його адаптивних можливостей, є режим і структура харчування.

Останнім часом найбільшу актуальність набуває проблема здорового харчування дітей і підлітків. Правильне харчування в дитячому та підлітковому віці сприяє профілактиці великої кількості захворювань, підвищенню працездатності і успішності школярів, їх гармонійному фізичному і розумовому розвитку, створює умови для адаптації підліткового покоління до навколишнього середовища і має суттєвий вплив на формування і стан здоров'я протягом усього його подальшого життя.

Важливу роль у структурі харчування дітей і підлітків займає споживання харчових продуктів в даний період онтогенезу. Недолік деяких нутрієнтів в їжі викликає нейрохімічні і нейрофізиологічні порушення. Розвиток білково-енергетичної недостатності у дітей створює передумови для зниження адаптаційного потенціалу організму і раннього формування хронічної соматопатології. Нейрофізіологічні механізми відображають зміну метаболізму в організмі дитини і багато в чому визначають функціональні відносини між нервової та ендокринними системами, які формують механізми адаптивних реакцій.

Кожна людина повинна володіти необхідними відомостями про раціональне харчування, речовинах, що становлять їжу, про їх роль у життєдіяльності організму. Все це формує культуру харчування, що є невід'ємною частиною здорового способу життя людини.

Харчування – це процес надходження, перетравлення, всмоктування і засвоєння в організмі харчових речовин, необхідних для покриття його енергетичних витрат, побудови та оновлення тканин, підтримки репродуктивної здатності, забезпечення і регуляції функцій організму [9].

Встановлено три функції харчування[10]:

– Перша функція полягає в постачанні організму енергією. У цьому сенсі людини можна порівняти з будь-якою машиною, що здійснює роботу, але вимагає для цього надходження палива. Раціональне харчування передбачає приблизний баланс надходить в організм енергії і витрачається на забезпечення процесів життєдіяльності.

[9] Вплив харчування на фізіологічні показники підлітків. URL: http://medbib.in.ua/vliyanie-pitaniya-psihofiziologicheskie.html (дата звернення: 19.01.2025).

[10] Грибан В. Г. Валеологія : підручник. Київ : Центр учбової літератури, 2008. 214 с.

– Друга функція харчування полягає в постачанні організму пластичними речовинами, до яких насамперед належать білки, меншою мірою – мінеральні речовини, жири і ще в меншій мірі – вуглеводи. У процесі життєдіяльності в організмі людини постійно руйнуються одні клітини та внутрішньоклітинні структури і замість них з'являються інші. Будівельним матеріалом для створення нових клітин і внутрішньоклітинних структур є хімічні речовини, що входять до складу харчових продуктів. Потреба в пластичних речовинах їжі варіює залежно від віку: у дітей така потреба підвищена (адже у них вони використовуються не тільки для заміни зруйнованих клітин і внутрішньоклітинних структур, але і для здійснення процесів росту), а у літніх людей знижена.

– Третя функція харчування полягає в постачанні організму біологічно активними речовинами, необхідними для регуляції процесів життєдіяльності. Ферменти і більшість гормонів – регулятори хімічних процесів, що протікають в організмі, – синтезуються самим організмом. Однак деякі коферменти (необхідна складова частина ферментів), без яких ферменти не можуть проявляти свою активність, а також деякі гормони організм людини може синтезувати тільки зі спеціальних попередників, що знаходяться в їжі. Цими попередниками є вітаміни, присутні в продуктах харчування.

Порівняно недавно з'явилися дані про існування ще однієї четвертої функції харчування, яка полягає у виробленні імунітету, як неспецифічного, так і специфічного. Було встановлено[11], що величина імунної відповіді на інфекцію залежить від якості харчування і особливо від достатнього вмісту в їжі калорій, повноцінних білків і вітамінів. При недостатньому харчуванні знижується загальний імунітет і зменшується опірність організму всіляким інфекціям. І навпаки, повноцінне харчування з достатнім вмістом білків, жирів, вітамінів і калорій підсилює імунітет і підвищує опірність інфекціям. У даному випадку мова йде про зв'язок харчування з неспецифічним імунітетом. Пізніше було виявлено, що певна частина хімічних сполук, які містяться в продуктах харчування, не розщеплюється в травному тракті або розщеплюється лише частково. Такі нерозщеплені великі молекули білків або поліпептидів можуть проникати через стінку кишечника в кров і, будучи чужорідними для організму, викликати його специфічний імунну відповідь. Ці чужорідні харчові білки в організмі виробляються специфічні антитіла. Таким чином, в процесі харчування відбувається постійне надходження

[11] Грибан В. Г. Валеологія : підручник. Київ : Центр учбової літератури, 2008. 214 с.

антигенів з травного тракту у внутрішнє середовище організму, що призводить до вироблення та підтримання специфічного імунітету до білків їжі.

1.3. Концептуальні засади функціонального харчування та механізми дії пробіотичних культур

Раціональне харчування (від лат. ratio – розумний) – достатнє в кількісному й повноцінне в якісному відношенні харчування, тобто повноцінне харчування здорових людей із врахуванням їх віку, статті, характеру праці та інших факторів. Раціональне харчування сприяє збереженню здоров'я, опірності шкідливим факторам навколишнього середовища, високій фізичній й розумовій працездатності, а також активному довголіттю.

Основа раціонального харчування – збалансованість, тобто оптимальне співвідношення компонентів їжі. За такого харчування до організму надходять різноманітні поживні речовини в кількостях, необхідних для нормальної життєдіяльності людини.

Раціональне харчування забезпечує сталість внутрішнього середовища і нормальний розвиток організму, що підтримує життєдіяльність різних органів і систем на високому рівні при різноманітних умовах праці та побуту.

Харчування повинно сприяти підвищенню процесу пристосування організму до впливу несприятливих факторів навколишнього середовища, зміцненню здоров'я, забезпечувати можливість адекватної реакції організму від надзвичайного зовнішнього стресового впливу.

Для забезпечення життєво необхідних процесів організму потрібні калорійні, якісні, повноцінні продукти. Вони повинні надходити в організм в нормованій кількості з їжею для відновлення постійних витрат енергії і клітин організму. Основне правило раціонального харчування є якість, різноманітність і нормований збалансований раціон[12].

За даними ВООЗ, здоров'я на 70 % залежить від харчування. Недотримання базових правил скорочує тривалість життя та провокує появу неінфекційних захворювань різного типу: онкологічних, серцево-судинних, цукрового діабету.

В даний час особливою актуальністю є створення продуктів харчування нового покоління, що пов'язане з недостатньою забезпеченістю населення життєво важливими нутрієнтами (мінеральними речовини, амінокислотами, харчовими волокнами й т. п.).

[12] Вплив харчування на фізіологічні показники підлітків. URL: http://medbib.in.ua/vliyanie-pitaniya-psihofiziologicheskie.html (дата звернення: 19.01.2025).

Особливу роль відіграє якість харчування та баланс макро- і мікронутрієнтів у регуляції нейромедіаторних процесів. Нутрієнти беруть участь у синтезі та метаболізмі серотоніну, дофаміну, норадреналіну та γ-аміномасляної кислоти, що безпосередньо пов'язано з емоційною регуляцією, рівнем тривожності та соматичними проявами психічного напруження. Дефіцит окремих мікронутрієнтів (зокрема вітамінів групи В, магнію, заліза, цинку, омега-3 жирних кислот) асоціюється зі зниженням адаптаційних можливостей організму, порушенням нейромедіаторної регуляції та підвищеною соматизацією психоемоційного напруження. Європейські рекомендації EFSA (European Food Safety Authority) наголошують на важливості адекватного нутрієнтного забезпечення для нормального функціонування нервової та ендокринної систем.

Концепція функціонального харчування робить наше життя кращим, адже здоров'я людини залежить переважно від харчових звичок та вподобань. Харчовий раціон сучасної людини різноманітний, проте його підґрунтя складають напівфабрикати та продукти, у виробництві яких застосовують різноманітні харчові добавки (дріжджі, цукри, посилювачі смаку тощо). Безумовно, існує ринок з брендом «Екопродукт», проте далеко не всі харчові продукти залишаються корисними до моменту їх вживання. Більшість із них втрачають цінність під час приготування чи зберігання.

Перші принципи концепції функціонального харчування були розроблені в 1984 році японськими вченими, які обґрунтували позитивний вплив певних продуктів харчування чи їхніх складників на певні функції організму людини. Основними критеріями, які визначають харчовий продукт як функціональний, зазначено такі[13]:

– мають містити речовини тільки природного походження;

– не мають виготовлятись у вигляді лікарських препаратів (капсул, пігулок, порошків тощо);

– мають бути частиною щоденного харчового раціону або споживатися протягом тривалого часу;

– мають забезпечувати цілеспрямований вплив на певні функції організму й здійснювати лікувально-профілактичний ефект.

У 1991 році в японському законодавстві було прописано визначення категорії «продукти для спеціального дієтичного харчування» (foods for special dietary use), яке пізніше було замінене на «продукти для специфікованого оздоровчого використання» (foods for specified health

[13] Functional foods. European Commission. Luxembourg : Publications Office of the European Union, 2010. 24 p.

use). Ця програма стала прообразом для подібних програм у Німеччині, Франції, Фінляндії, Швеції, США, Канаді, Китаї, Південній Кореї та багатьох інших країнах. У 1999 році в Європі посилився інтерес до концепцій «Науки про функціональні харчові продукти» та «Вимоги здоров'я», унаслідок чого була створена Європейська комісія для дій у рамках науки про функціональні харчові продукти (FUFOSE). Завдання комісії було спрямовано на розробку та затвердження науково обґрунтованого підходу щодо розвитку виробництва харчових продуктів, які можуть позитивно впливати на певні фізіологічні функції, а також покращувати здоров'я та самопочуття й знижувати ризик виникнення захворювань. Це дало поштовх для практичної реалізації концепції функціонального харчування в Європі та введення терміну «функціональні харчові продукти» (functional food).

Під терміном «функціональні продукти харчування» розуміють систематичне використання продуктів природного походження, які здатні нормалізувати та регулювати окремі функції й біохімічні реакції певних систем, органів та організму загалом для зміцнення здоров'я та самопочуття, а також зниження ризику захворювання[14].

Відповідно до світової практики продукт вважається функціональним, якщо регламентований вміст мікронутрієнтів в його складі достатній для задоволення (при звичайному рівні споживання) 25–50 % від середньодобової потреби в даних компонентах.

Сьогодні відомо більше 300 тис. найменувань функціональних харчових продуктів. У Японії це майже 50 %, у США і Європі близько 25 % від всіх харчових продуктів, що випускають. Якщо говорити про конкретні приклади, то за останні роки частка «здорового хліба» у США збільшилася в загальному обсязі виробництва з 18 до 34 %, а в Німеччині – в 2 рази. Як вважають японські й американські вчені, саме функціональні продукти в недалекому майбутньому змінять загальну структуру харчування всіх людей на Землі, вони наполовину витиснуть ринок лікарських препаратів.

Одним з головних факторів, що сприяють розвитку виробництва функціональних харчових продуктів, є спосіб життя середньостатистичного жителя нашої планети, яке характеризується різким зниженням фізичної активності, що призводить до підвищення вимог до якості їжі. У розвинених країнах сектор функціональних харчових продуктів і напоїв має першорядне значення, оскільки це найбільш

[14] Functional foods. European Commission. Luxembourg : Publications Office of the European Union, 2010. 24 p.

зручна, природна форма насичення організму людини мікронутрієнтами: вітамінами, мінеральними речовинами, мікроелементами й іншими мінорними компонентами, наприклад, поліфенолами, джерелом яких служать фрукти, овочі, ягоди й т. п. Крім того, це ще й високорентабельна сфера господарювання. Ринок функціональних харчових продуктів специфічний і динамічний сегмент діяльності, що вимагає наявності кваліфікованого й ініціативного персоналу, здатного швидко й ефективно провести повний цикл розробки й впровадження принципово нового продукту від лабораторних досліджень і клінічних випробувань до запуску у виробництво з необхідним набором нормативної й технологічної документації. Таким чином, світовий і вітчизняний досвід переконливо свідчить, що найбільш ефективним і доцільним з економічної, соціальної, гігієнічної й технологічної точок зору способом кардинального рішення проблеми дефіциту споживання населенням необхідних мікронутрієнтів є випуск функціональних харчових продуктів, збагачених вітамінами, макро- та мікроелементами до рівня, що відповідає фізіологічним потребам людини. На сьогодні ефективно використовуються 7 основних видів функціональних інгредієнтів: харчові волокна (розчинні та нерозчинні), вітаміни, мінеральні речовини (кальцій, йод, селен, залізо та ін.), антиоксиданти (β-каротин, біофлавоноїди, α-токоферол та ін.), поліненасичені жирні кислоти, пребіотики (інулін, лактоза, молочна кислота та ін.), пробіотики (біфідо- та лактобактерії та ін.)[15, 16].

1.3.1. Харчові волокна у складі функціональних харчових продуктів

Харчові волокна (харчова клітковина, дієтичні волокна) – природні компоненти їжі, стійкі до дії амілази й інших ферментів, не перетравлюються ендогенними секретами шлунково-кишкового тракту людини і не всмоктуються в тонкій кишці; впливають на процеси травлення і всмоктування поживних речовин[17]. Більшість харчових волокон – некрохмальні полісахариди: целюлоза, геміцелюлози, олігосахариди, запасні полісахариди рослин, камеді, слизи, пектинові речовини, а також лігнін – полімер фенольної природи[18].

---

[15] Грибан В. Г. Валеологія : підручник. Київ : Центр учбової літератури, 2008. 214 с.

[16] Функціональні продукти харчування як перспективні лікувально-профілактичні та дієтичні засоби / О. Калюжная та ін. *Загальна теорія здоров'я та здоров'язбереження* : колект. монографія. Харків, 2017. С. 185–194.

[17] Slavin J. Fiber and Prebiotics: Mechanisms and Health Benefits. *Nutrients*. 2013. Vol. 5, № 4. P. 1417–1435. URL: https://doi.org/10.3390/nu5041417

[18] Пектинові речовини та їх роль у харчуванні : монографія / О. В. Самохвал та ін. Харків : ХДУХТ, 2012. 164 с.

Деградація харчових волокон проходить у товстій кишці під впливом анаеробних мікроорганізмів, які ферментують більш розчинні полісахариди. Менш розчинні глікани і лігнін зазнають часткових змін і беруть участь у формуванні калу.

Харчові волокна мають різну здатність до ферментації. Зокрема, ті, що містяться у фруктах та овочах ферментується у середньому на 50 %.

Під час ферментації виробляються три найважливіші продукти: коротколанцюгові жирні кислоти (оцтова, пропіонова, масляна, ізомасляна, валеріанова, ізовалеріанова, мурашина, капронова), гази (у більших кількостях – водень, що екскретується, CO_2, CH_4, NH_3, NO) й енергія. Всмоктавшись, жирні кислоти доступні аеробному метаболізму в тканинах організму і є джерелом енергії, яка використовується корисною мікрофлорою товстої кишки для росту й життєдіяльності (пребіотичний ефект). Поліпшення живлення стимулює ріст мікробіоти, що гальмує розвиток патогенних мікробів. Крім енергетичної цінності, коротколанцюгові жирні кислоти та інші метаболіти мають низку позитивних місцевих і системних ефектів на макроорганізм: поставлення субстратів ліпо- і глюконеогенезу, підтримка іонного обміну, здійснення антибактеріального ефекту й блокування адгезії патогенів, активація місцевого імунітету, регуляція й диференціювання епітелію тощо.

Іншими ланками механізму дії харчових волокон є підвищення активності ліпази у тонкій кишці, зниження рівня аліментарної глікемії, збереження морфологічної структури харчових ворсинок кишки[19].

1.3.2. Пробіотики, як інгредієнти функціональних харчових продуктів

Серед наведених складників, що відрізняють харчовий продукт як функціональний, на нашу думку, найбільш важливим є саме пробіотичні бактерії, адже саме вони сприяють формуванню корисної мікрофлори кишківника людини, без якої не відбуватиметься повноцінне засвоєння організмом вітамінів, мінералів та інших поживних і корисних речовин з їжі. Завдяки антагоністичним властивостям пробіотики допомагають організму боротися зі шкідливими мікроорганізмами, зменшують ризик захворювань та підтримують імунну систему. Молочнокислі бактерії беруть участь у синтезі вітамінів групи В та вітаміну К, які мають незаперечливу цінність для здоров'я людини.

[19] Gill C., et al. Dietary fibre in healthy ageing: focus on the role of the gut microbiota. *Proceedings of the Nutrition Society*. 2021. Vol. 80, № 1. P. 95–104.

Молочнокислі бактерії (МКБ) – специфічна група мікроорганізмів, що здійснює молочнокисле бродіння, тобто розпад лактози та інших вуглеводів до молочної кислоти з утворенням інших побічних продуктів. Основними серед МКБ є Біфідобактерії (*Bifidobacterium*) та Лактобактерії (*Lactobacillus*)[20]. Лактобактерії – це палички, які розміщуються поодиноко, попарно чи короткими ланцюжками, розміром 4–10 мкм. Вони нерухомі, спор і капсул не утворять, грампозитивні. Біфідобактерії – рід облігатно анаеробних грам-позитивних бактерій, які не утворюють спор і відрізняються гіллястою морфологією. Їх морфологічною особливістю є роздвоєння на кінці палички, внаслідок чого вони мають V або Y-подібну форми. Клітини біфідобактерій являють собою зігнуті палички довжиною 2–5 мкм. Спори не утворюють.

За своєю природою вони належать до непатогенних грампозитивних анаеробів з високою ферментативною активністю. Більшість МКБ оптимально розвиваються за температури $30 \div 45$ °С. У процесі ферментації утворюється молочна кислота, що призводить до зниження pH продукту. Також вона слугує консервантом та впливає на текстуру й смак кінцевого продукту.

Біфідобактерії та Лактобактерії мають виражений мікробний антагонізм, регулюють певний кількісний і якісний склад нормальної кишкової флори, стримують зростання і розмноження патогенних й умовно-патогенних мікробів у кишківнику, що є важливим фактором захисту організму, особливо дітей раннього віку, від розвитку кишкових інфекцій[21]. Нарівні з іншими представниками нормальної флори кишківника МКБ беруть активну участь у травленні і всмоктуванні. Вони сприяють процесам ферментативного переварювання їжі, тому що підсилюють гідроліз білків, зброджують вуглеводи, жири обмилюють, розчиняють клітковину, стимулюють перистальтику кишківника, сприяють нормальній евакуації кишкового вмісту.

Біфідобактерії несуть вітаміноутворювальну функцію. Вони беруть участь у синтезі та всмоктуванні вітамінів групи В, вітаміну К, фолієвої та нікотинової кислот, сприяють синтезу незамінних амінокислот, кращому засвоєнню солей кальцію, вітаміну D, мають антианемічну, антирахітичну й антиалергічну дії[22].

---

[20] Гусєв М. В., Мінєєва Л. А. Мікробіологія : підручник. Київ : Нова книга, 2003. 464 с.

[21] Фармацевтична біотехнологія : посібник / Д. В. Моісєєв та ін. ; за ред. Д. В. Моісєєва. Харків : НФАУ, 2019. 293 с.

[22] Сирохман І. В., Завгородня В. М. Товарознавство харчових продуктів функціонального призначення : навч. посіб. Київ : Центр учбової літератури, 2009. 544 с.

Лактобактерії пригнічують ріст гнильних і умовно патогенних мікроорганізмів за рахунок здатності виділяти цілу низку речовин: молочну кислоту, лізоцим, бактеріоцини (лактоцини B, F, J, M, лактобревін, плантарицин і ін.). Ці продукти життєдіяльності лактобактерій мають виражений антибактеріальний ефект, а також впливають на мембрани епітеліоцитів, синтез ДНК і протеїнів[23].

Шлунково-кишковий тракт населяє величезна кількість бактерій, що відповідають за правильне травлення. Молочнокислі бактерії – найбільш важливі серед них. Вони сприяють перетравленню їжі, стимулюють перистальтику (скорочення) кишечника і сприяють правильному його очищенню; беруть участь в засвоєнні вітамінів, фолієвої та нікотинової кислот, солей, кальцію, надають антиалергічну дію і зміцнюють імунітет.

МКБ чинять антагоністичну дію відносно збудників дизентерії, сальмонел, ентеропатогенних кишкових паличок та ін. Механізм їхньої антагоністичної дії до кінця не вивчений. Встановлено, що в процесі анаеробної ферментації вуглеводів МКБ виробляють оцтову і молочну кислоти, які перешкоджають росту і розмноженню патогенної та умовно-патогенної мікрофлори.

МКБ входять до складу еубіотичної (нормальної), так званої пристінкової мікрофлори товстого кишечника, яка здатна виявляти захисний екрануючий ефект, в кількісному відношенні домінують у порівнянні з іншою нормофлорою, становлячи 99 % мікрофлори товстого кишечнику здорової грудної дитини. З роками ця кількість поступово зменшується до 60–90 % у дорослої людини. Норма для дорослої людини складає 34 %. Щоб кишечник був здоровим, людині дуже важливо підтримувати стан і чисельність біфідобактерій в цих рамках. В іншому випадку виникають різні порушення роботи шлунково-кишкового тракту.

У разі порушення балансу «корисних» і «шкідливих» мікроорганізмів в травному тракті розвивається дисбактеріоз. Нерідко захворювання також може бути супутником хвороб шлунку і кішківника. При нестачі молочнокислих бактерій відбувається стрімкий розвиток гострої кишкової інфекції, можлива діарея, бродіння і гниття, скупчення жовчних кислот. У деяких випадках можливі запори, метеоризм, неприємний запах з рота, печія, сильне здуття[24].

Вплив молочнокислих бактерій на організм людини не обмежується лише їхньою здатністю до колонізації кишечника. Сучасні дослідження

[23] Сайт офіційного виробника та продавця заквасок VIVO. URL: https://www.zakvaski.com/production/probio-yogurt-vivo.html (дата звернення: 22.12.2025).

[24] Кухтин М. Д. Лабораторний практикум з мікробіології. URL: https://elartu.tntu.edu.ua/bitstream/lib/41178/1/Kukhtyn_Laboratornyy_praktykum_2023.pdf (дата звернення: 20.12.2023).

вказують на критичну роль їхніх метаболітів – постбіотиків, які утворюються в процесі ферментації[25]. Окрім молочної кислоти, що знижує pH середовища та пригнічує розвиток патогенів, МКБ синтезують бактеріоцини (природні антимікробні пептиди).

Особливе значення мають коротколанцюгові жирні кислоти, зокрема бутират та ацетат. Вони виступають основним енергетичним субстратом для колоноцитів (клітин епітелію кишечника) та сприяють зміцненню контактування клітин слизової оболонки[26]. Це значно знижує проникність кишкового бар'єру для ендотоксинів та алергенів, що є ключовим механізмом профілактики системного запалення та підтримки імунітету[27].

1.4. Технологічні можливості розширення асортименту функціональних харчових продуктів на основі рослинної та борошняної сировини

Основним та найбільш характерними харчовим продуктом, що виготовляють із використанням МКБ, є кисломолочні продути (кефір, йогурт, сметана) та продукти, виготовлені на основі молока тваринного походження (тверді та м'які сири), тобто ці продукти за попередньо висловленою теорією є функціональними[28, 29].

Водночас не всі люди за певних, переважно медичних причин, можуть уживати молочні та кисломолочні продукти, тому виникає потреба розширити асортимент функціональних харчових продуктів, у складі яких мали б бути пробіотичні культури молочнокислих бактерій. Повертаючись до визначених критеріїв функціональності продуктів, наголошуємо, що вони мають бути щоденного вжитку. Таким продуктом зазвичай є хліб, проте головною умовою для виготовлення хліба як функціонального продукту є заміна хлібопекарських дріжджів хлібною

---

[25] Salminen S., et al. The International Scientific Association for Probiotics and Prebiotics (ISAPP) consensus statement on the definition and scope of postbiotics. *Nature Reviews Gastroenterology & Hepatology*. 2021. Vol. 18. P. 649–667. DOI: https://doi.org/10.1038/s41575-021-00440-6.

[26] Wang S., et al. Postbiotics and their biotherapeutic potential for chronic disease and their feature perspective: a review. *Frontiers in Microbiomes*. 2025. Vol. 4. Art. 1489339

[27] Piqué N., Berlanga M., Miñana-Galbis D. Postbiotics: Alternative to Probiotics in Cardiovascular Diseases and Metabolic Disorders. Molecules. 2024. Vol. 29, № 11. P. 25–38.

[28] Зеленський Д., Непошивайленко Н. Оцінка харчового продукту на титр молочнокислих бактерій (на прикладі розсільного сиру типу «Бринза»). *Youth Pharmacy Science* : матеріали І Всеукр. наук.-практ. конф. (м. Харків, 27–29 квіт. 2021 р.). Харків, 2021. С. 446.

[29] Непошивайленко Н., Корнієнко І., Анацький А. Удосконалення рецептури приготування розсільного сиру типу «Бринза» з підвищеним титром молочнокислих бактерій. *Збірник наукових праць Дніпровського державного технічного університету (технічні науки).* 2022. Т. 1, № 40. С. 164–174.

закваскою із підвищеним титром життєздатних клітин молочнокислих бактерій. Крім того, підвищення функціональних ознак можна досягти завдяки заміні борошна високого ґатунку на цільнозернове, багате на харчові волокна.

Як наведено в опублікованих наукових працях, молочнокислі бактерії мають підвищені адаптивні властивості відповідно до негативних факторів, зокрема впливу високих температур, заморожування та ультразвукових коливань. Проведені дослідження щодо ферментації борошняного складника з подальшим випіканням показують збереження біологічної активності та життєздатності клітин молочнокислих бактерій[30, 31, 32, 33].

Проведені дослідження щодо пошуку поживного середовища для розвитку молочнокислих бактерій з метою виготовлення функціонального харчового продукту[34, 35] дозволяють розширити асортимент функціональних харчових продуктів, виготовлених на основі рослинної сировини, а саме фруктового пюре з додаванням пробіотичних культур молочнокислих бактерій. Такий варіант харчового продукту буде функціональним завдяки наявності не тільки активних та життєздатних клітин МКБ, а й харчовим волокнам, пектину, вітамінам та іншим нутрієнтам, на які багаті фрукти.

Отже, одна із задач нашого дослідження полягала в розробленні рецептури та технології харчових продуктів щоденного раціону людини, що мають функціональні ознаками завдяки додатковому збагаченню пробіотичиними культурами молочнокислих бактерій. Перевірка

---

[30] Корнієнко І. Дослідження впливу ультразвукових коливань на титр молочнокислих бактерій тіста. *Біотехнологія XXI століття* : тези XV Всеукр. наук.-практ. конф. (м. Київ, КПІ). Київ, 2021. С. 55.

[31] Полончук Л., Корнієнко І. Адаптивні властивості молочнокислих бактерій до несприятливих умов та факторів навколишнього середовища. *Авіація в XXI столітті* : тези X Всесвіт. конгр. (м. Київ, НАУ). Київ, 2022. С. 4.1.46–4.1.49.

[32] Функціонально-технологічні властивості заморожених напівфабрикатів, кріоконсервація готових хлібопродуктів / І. Корнієнко та ін. Київ : НАУ, 2021. 54 с.

[33] Korniienko I., Kuznietsova O., Garkava K. Formation of individual human health: modern biotechnological trends in the use of probiotic microorganisms in functional sourdough bakery. *Scientific and educational dimensions of natural sciences* : Scientific monograph. Riga, Latvia, 2023. P. 375–403. URL: https://doi.org/10.30525/978 (дата звернення: 20.12.2025).

[34] Непошивайленко Н., Корнієнко І. Актуальні проблеми індивідуального здоров'я підлітків та застосування сучасних біотехнологій виробництва функціональних продуктів харчування з метою їх вирішення. *Actual problems of natural sciences: modern scientific discussions* : Collective monograph. Riga: Izdevniecība "Baltija Publishing", 2020. P. 391–408.

[35] Пошук поживного середовища для розвитку молочнокислих бактерій з метою виготовлення функціонального харчового продукту / Н. Непошивайленко та ін. *Біотехнологія XXI століття* : матеріали XVII Міжнар. наук.-практ. конф. (м. Київ, КПІ). Київ, 2023. С. 141–143.

результативності дослідження полягала в установленні функціональної цінності власноруч виготовлених харчових продуктів. Оскільки під час дослідження застосовуються різні температурні режими приготування функціональних харчових продуктів, поставлене завдання – оцінити ознаки збереження функціональних властивостей готового до вживання продукту.

2. Концепція проведення досліджень

2.1. Технологічні аспекти приготування функціональних продуктів

У рамках проведених досліджень, запропоновано наступні рецептури виготовлення функціональних харчових продуктів, використовуючи біологічно активні інгредієнти у їх складі.

1) Кисломолочний йогурт: коров'яче молоко жирністю 2,6 % (пастеризоване у виробничих умовах); висококонцентрована закваска «Пробіо Йогурт VIVO" з вмістом *Bifidobacterium lactis*, *Bifidobacterium infantis, Lactobacillus acidophilus*, *Lactobacillus casei, Lactobacillus rhamnosus, Lactobacillus paracasei, Lactobacillus delbrueckii ssp Bulgaricus, Streptococcus thermophilus.*

2) Фруктове (яблучне) пюре: яблука; цукор; очищена питна вода; висококонцентрована закваска «Пробіо Йогурт VIVO" з вмістом *Bifidobacterium lactis*, *Bifidobacterium infantis, Lactobacillus acidophilus*, *Lactobacillus casei, Lactobacillus rhamnosus, Lactobacillus paracasei, Lactobacillus delbrueckii ssp Bulgaricus, Streptococcus thermophilus.*

3) Цільнозерновий хліб на хлібній заквасці: борошняна суміш (борошно цільнозернове пшеничне, борошно пшеничне вищого ґатунку у співвідношенні 1:1); очищена питна вода; сіль; хлібна закваска, виготовлена на основі висококонцентрованої закваски «Пробіо Йогурт VIVO" з вмістом *Bifidobacterium lactis*, *Bifidobacterium infantis, Lactobacillus acidophilus*, *Lactobacillus casei, Lactobacillus rhamnosus, Lactobacillus paracasei, Lactobacillus delbrueckii ssp Bulgaricus, Streptococcus thermophilus.*

Під час виготовлення функціональних харчових продуктів використане таке обладнання: духова шафа; блендер; термостат; морозильна камера.

Оцінка функціональних властивостей виготовлених харчових продуктів здійснена в біотехнологічній лабораторії із застосуванням термостата, мікроскопа, вагів з точністю до 1 г, а також лабораторного посуду (пробірки, мірні циліндри, чашки Петрі).

Технологічна процедура складалася з таких етапів.

1) Приготування кисломолочного йогурту:

– підігріти до температури 40 °С коров'яче молоко жирністю 2,6 %, пастеризоване у виробничих умовах;

– додати пробіотичні культури молочнокислих бактерій (закваску «Пробіо Йогурт VIVO”) в кількості 1 г на 2 л молока (за рекомендацією товаровиробника);

– перемішати, відправити для сквашування в термостат за температури 40°С на 8 годин.

2) Приготування фруктового (яблучне) пюре:

– запекти яблука в духовій шафі за температури 180 °С впродовж 20 хв. та охолодити до температури 40 °С;

– вимити й звільнити від серцевини свіжі яблука;

– подрібнити в блендері запечені та підготовлені свіжі яблука в пропорції 1:1;

– додати пробіотичні культури молочнокислих бактерій (закваску «Пробіо Йогурт VIVO”) в кількості 1 г на 2 л пюре;

– перемішати та відправити на ферментацію в термостат за температури 35 °С на 8 годин.

3) Приготування хлібної закваски:

– змішати в рівних пропорціях борошняну суміш (борошно цільнозернове пшеничне, борошно пшеничне вищого ґатунку);

– додати очищену питну воду в співвідношенні 1:1;

– додати пробіотичні культури молочнокислих бактерій (закваску «Пробіо Йогурт VIVO”) в кількості 1г на 1кг хлібної закваски;

– перемішати та відправити у термостат за температури 35 °С;

– кожні 12 годин упродовж 7 діб проводити оновлення хлібної закваски шляхом перемішування частини поточної закваски, борошняної суміші та питної води в співвідношенні 2:1:1;

– на 8-му добу ½ частину отриманої хлібної закваски поставити в морозильну камеру за температури −5 °С на 10 діб.

4) Випікання цільнозернового хліба на хлібній заквасці:

– замісити тісто з борошняної суміші (борошно цільнозернове пшеничне, борошно пшеничне вищого ґатунку в співвідношенні 1:1) та води в пропорції 2:1, додати солі за смаком, розподілити тісто на дві рівні частини та залишити для аутолізу на 1 годину за температури 20 °С;

– додати в одну частину підготовленого тіста хлібну закваску, що не піддавалася заморожуванню в пропорціях 4:1;

– додати в другу частину підготовленого тіста хлібну закваску, попередньо розморожену та активовану впродовж 12 годин, у пропорціях 4:1;

– сформувати окремо кожну хлібну заготовку та залишити для розстоювання в термостаті за температури 30 °С впродовж 3 годин,

– випікати хліб у духовій шафі за температури 230 °С впродовж 30 хвилин.

5) Виконати трикратне повторення дій за пунктами 1–4.

6) Провести мікробіологічні дослідження метод Коха у наступній послідовності:

– взяти наважку масою 1г кожного з виготовлених функціональних продуктів;

– провести десятикратні розведення підготовлених зразків згідно із стандартними мікробіологічними методиками;

– посіяти в чашки Петрі на поживний м'ясо-пептонний агар підготовлені розведені зразки та поставити в термостат за температури 40 °С впродовж 24 годин;

– провести мікроскопію з визначення загальної кількості клітин МКБ.

7) Провести дослідження органолептичних та якісних показників:

– зібрати контрольні групи респондентів та провести серед них інструктаж щодо вимог, які рекомендовано в державних стандартах якості (ДСТУ) до відповідного харчового продукту, запропонованого для дегустації;

– провести дегустацію кожного з виготовлених функціональних продуктів, зібрати результати оцінок респондентів та надати середньо-статистичну оцінку органолептичних показників та оцінку відповідності ДСТУ кожного з виготовлених функціональних продуктів.

Під час проведення експерименту забезпечено стерильні умови технологічного процесу виготовлення відповідного функціонального харчового продукту (сквашування, ферментація, випікання, заморожування).

У кожному готовому до споживання функціональному харчовому продукті на третю добу після виготовлення визначено загальну кількість клітин пробіотичних культур МКБ. Група респондентів оцінила всі харчові продукти за органолептичними та якісними показниками, що відповідають державним стандартам відповідних харчових продуктів.

2.2. Оцінка стану здоров'я респондентів згідно визначення кількісного та якісного складу кишкової мікробіоти

В якості респондентів для проведення досліджень обрано здобувачів освіти Комунального закладу «Ліцей № 31» Кам'янської міської ради, віком 15–16 років які не мали хронічних захворювань та шкідливих звичок, ведуть активній спосіб життя та займалися у звичайній групі по фізкультурі без значних фізичних навантажень. Таким чином сформовано групи респондентів по 10 учнів в кожній.

Перед початком дослідження респондентам було запропоновано здати аналіз калу на предмет визначення різноманіття кишкової мікробіоти у їх кишківнику.

Впродовж 2 наступних тижнів респондентам було запропоновано ввести до свого раціону виготовлений функціональний харчовий продукт:

1 група – Фруктове (яблучне) пюре;

2 група – Цільнозерновий хліб на хлібній заквасці (без заморожування закваски);

3 група – Цільнозерновий хліб на хлібній заквасці (з попереднім заморожуванням закваски).

Кожній групі респондентів надавались відповідні функціональні продукти в кількості 200 г/добу, які вони вживали двома рівними порціями зранку та ввечері після основного прийому їжі. Свіжоприготовлені продукти зберігатись в холодильнику при температурі не вище 5 °С не більше 3-х діб.

Після двотижневого прийому виготовлених видів функціональних продуктів, респондентам було запропоновано повторно здати аналіз калу предмет бактеріологічного дослідження кишкової мікробіоти.

3. Експериментальна оцінка функціональних властивостей та оздоровчого потенціалу нововведених до щоденного раціону підлітків харчових продуктів

3.1. Мікробіологічна оцінка та верифікація функціональних характеристик розроблених продуктів харчування

У результаті реалізації технологічних етапів та біотехнологічних підходів, виготовлено харчові продукти, функціональні властивості яких оцінено згідно з проведеними мікробіологічними дослідженнями. Результати досліджень наведено в табл. 1.

Згідно з результатами, наведеними в табл. 1, установлено, що кожен з досліджених харчових продуктів має функціональні властивості, оскільки в зразку кожного продукту на третю добу після приготування визначено колонії молочнокислих бактерій. Найбільша кількість клітин МКБ зафіксована в кисломолочному йогурті, адже молоко тваринного походження є характерним середовищем для розвитку МКБ, а сприятливий температурний режим обробки є придатним для збереження життєздатності пробіотичних культур та хлібі.

У зразках хліба, спеченого на хлібній заквасці, зберігається висока кількість клітин МКБ, обумовленого стійкістю пробіотичних культур МКБ, що пояснюється захисною дією харчової матриці

хліба – крохмально-білкова структура м'якуша екранує клітини МКБ від кисню, світла та коливань вологості, знижує дію термічного стресу (частина клітин зберігається у мікропорах),створює ефект мікроінкапсуляції. У результаті виживаність МКБ у хлібі значно вища, ніж у рідких харчових системах.

Таблиця 1

Показники функціональності розроблених продуктів ($n = 10$, $M \pm m$)

Дослідні зразки	Загальна кількість колоній, КУО/ см³		
	Початковий	Здобутий результат	Норма***
Кисломолочний йогурт	$(1{,}0 \pm 0{,}1) \cdot 10^{10}$*	$(8{,}7 \pm 0{,}1) \cdot 10^{9}$	$1{,}0 \cdot 10^{7}$
Яблучне пюре	$(1{,}0 \pm 0{,}1) \cdot 10^{10}$*	$(1{,}1 \pm 0{,}2) \cdot 10^{5}$	Не нормуються
Хліб на заквасці (без заморожування закваски)	$(5{,}7 \pm 0{,}2) \cdot 10^{7}$ **	$(5{,}0 \pm 0{,}2) \cdot 10^{7}$	Не нормуються
Хліб на заквасці (з попереднім заморожуванням закваски)	$(5{,}7 \pm 0{,}2) \cdot 10^{7}$ **	$(5{,}3 \pm 0{,}3) \cdot 10^{7}$	Не нормуються

M – середнє арифметичне; *m* – стандартна похибка середнього

* Закваска «Пробіо Йогурт VIVO"[36]

** Власноруч виготовлена хлібна закваска

*** ДСТУ 4343:2004. Йогурти. Загальні технічні умови[37]

Після випікання у хлібі зберігаються ферментовані цукри (мальтоза, декстрини) та продукти гідролізу крохмалю (завдяки амілазам). Це дозволяє окремим штамам молочнокислих бактерій повільно відновлювати метаболізм, а інколи навіть здійснювати обмежений поділ клітин у перші 48–72 години. Можливе формування сублетально ушкоджених клітин. Термічна обробка не знищує всі МКБ, їх частина переходить у стан VBNC, які за сприятливих умов зберігання реактивуються. При цьому бактеріологічний аналіз, проведений на 3 добу, фіксує вищий титр, ніж одразу після випікання.

В результаті попереднього заморожування хлібної закваски кількість клітин МКБ в хлібі навіть збільшується, про що свідчать результати, наведені в табл. 1.

[36] Сайт офіційного виробника та продавця заквасок VIVO. URL: https://www.zakvaski.com/production/probio-yogurt-vivo.html (дата звернення: 22.12.2025).

[37] ДСТУ 4343:2004. Йогурти. Загальні технічні умови. Київ : Держспоживстандарт України, 2005. 12 с. URL: https://online.budstandart.com/ua/catalog/doc-page.html?id_doc=72933 (дата звернення: 20.12.2025).

Функціональні ознаки також зберігаються для яблучного пюре, незважаючи на найнижчу кількість клітин МКБ у цьому продукті. Виявлений титр клітин МКБ у яблучному пюре та хлібній заквасці доводить їхню життєздатність у нехарактерному для їхнього розвитку середовищі за умов сприятливого температурного режиму приготування цих продуктів.

Усі харчові продукти оцінено групою респондентів за органолептичними та якісними показниками, що відповідають державним стандартам якості відповідних харчових продуктів[38, 39, 40, 41]. Результати досліджень наведено на рис. 1.

З рис. 1 видно, що респонденти позитивно оцінили запропоновані для дегустації харчові продукти з 85–95 % відповідністю до норм ДСТУ. Найвищу оцінку якості відповідно до норм отримали кисломолочний йогурт та цільнозерновий хліб на хлібній заквасці, яка була попередньо заморожена. За найкращими органолептичними показниками, на думку респондентів, також є хліб на заквасці з попереднім її заморожуванням та яблучне пюре.

Виявлення функціональних ознак виготовлених харчових продуктів оцінювали за наявністю колоній МКБ у дослідних зразках та підрахунком у них загальної кількості клітин МКБ. Оскільки тільки в одному із досліджених функціональних продуктів (кисломолочному йогурті) згідно з чинними ДСТУ нормується цей показник, спиралися на норму саме для нього – $1{,}0 \cdot 10^7$.

При порівнянні з наявними нормами визначили, що усі виготовлені харчові продукти мають функціональні ознаки за рядом спадання в них кількості пробіотичних культур клітин МКБ: йогурт > хліб на заквасці > яблучне пюре. Нестачу клітин МКБ у запропонованих харчових продуктах можна компенсувати підвищенням добової кількості вживання таких продуктів. Наприклад, добова норма вживання йогурту

---

[38] ДСТУ 4343:2004. Йогурти. Загальні технічні умови. Київ : Держспоживстандарт України, 2005. 12 с. URL: https://online.budstandart.com/ua/catalog/doc-page.html?id_doc=72933 (дата звернення: 20.12.2025).

[39] ДСТУ 4084-2001. Консерви фруктові пюреподібні для дитячого харчування. Технічні умови. Київ : Держстандарт України, 2002. 18 с. URL: https://online.budstandart.com/ua/catalog/doc-page?id_doc=72407 (дата звернення: 20.12.2025).

[40] ДСТУ-П 4588:2006. Вироби хлібобулочні для спеціального дієтичного споживання. Загальні технічні умови. Київ : Держспоживстандарт України, 2007. 10 с. URL: https://dnaop.com/html/33877/doc-ДСТУ-П_4588_2006 (дата звернення: 20.12.2025).

[41] ДСТУ 7517:2014. Хліб із пшеничного борошна. Загальні технічні умови. Київ : Мінекономрозвитку України, 2015. 15 с. URL: http://online.budstandart.com/ua/catalog/docpage.html?id_doc=77546] (дата звернення: 20.12.2025).

для підлітка складає 200 г/добу, а хліба – 500 г/добу. Отже, збільшена кількість уживання хліба на заквасці, збагаченого пробіотичними культурами, дозволить отримати споживачу добову потребу МКБ тільки завдяки хлібу. Якщо частину добового раціону функціонального хліба замінити на яблучне пюре, збагачене пробіотичними культурами, чи на кисломолочний йогурт, у цьому випадку споживач буде забезпечений добовою нормою біфідо- та лактобактерій, що позитивно впливає на його здоров'я.

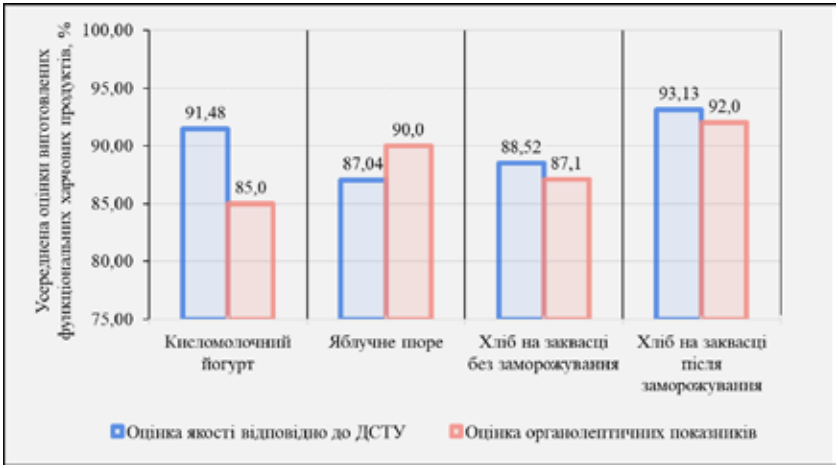


Рис. 1. Діаграма усередненої оцінки виготовлених функціональних харчових продуктів згідно з дегустацією респондентів, у відсотках

Установлено, що в усіх без винятку харчових продуктах упродовж трьох діб зберігається високий титр МКБ незалежно від технології виготовлення. Хоча технологія випікання хліба й потребує застосування високих температур, температура на поверхні виробу та в його середині під час випікання не піднімається вище за 180 °С та 70 °С відповідно, що є придатною для термофільного консорціуму в складі вихідної закваски «Пробіо Йогурт VIVO". У результаті високотемпературного процесу титр МКБ знижується від хлібної закваски ($5{,}7 \cdot 10^7$) до спеченого хліба ($5{,}0 \cdot 10^7 \div 5{,}3 \cdot 10^7$), проте завдяки утворенню захисної плівки клейковиною борошна всередині хлібного м'якуша під час випікання життєздатність МКБ не втрачається. Установлено, що кількість клітин МКБ в хлібі, спеченому на хлібній заквасці з попереднім її заморожуванням, більша, ніж без попереднього заморожування, що

також підтверджує високу варіабельність умов розвитку пробіотичних культур МКБ.

Питання збереження функціональних властивостей МКБ у складі хлібобулочних виробів після термічної обробки має наукове обґрунтування через концепцію парапробіотиків[42]. Під час випікання температура в центрі м'якушки хліба зазвичай не перевищує 95–98 °С, а час впливу пікових температур є обмеженим. Додатковим фактором захисту клітин МКБ виступає крохмально-білкова матриця продукту, яка створює ефект мікроінкапсуляції, що частково нівелює тепловий шок для клітин[43].

Навіть у випадку інактивації частини життєздатних клітин, продукт зберігає свою функціональність за рахунок концепції парапробіотиків (неживих мікробних клітин). Клітинні стінки інактивованих лактобактерій (пептидоглікани та тейхоєві кислоти) залишаються імунологічно активними. Вони взаємодіють з рецепторами імунної системи кишечника, стимулюючи неспецифічну резистентність організму[44]. Таким чином, розроблений функціональний хліб з використанням заквасок VIVO забезпечує біологічний відгук навіть після завершення циклу випікання.

Додаткове збагачення виготовлених харчових продуктів пробіотичними культурами МКБ сприяють поліпшенню якісних, відповідно до ДСТУ, та органолептичних характеристик, що підтверджено високими оцінками респондентів під час дегустації. Високі якісні показники відповідно до нормативів для яблучного пюре поступаються їхнім органолептичним показникам, а для кисломолочного йогурту – навпаки, що пояснюється віковими вподобаннями респондентів (фокус-групу респондентів на 80 % формували підлітки). Цільнозерновий хліб на заквасці за усіма ознаками підтримала більшість респондентів, що характеризує цей продукт як найбільш вживаний у щоденному раціоні. Отже, саме його радимо популяризувати як основний функціональний харчовий продукт (за умови дотримання запропонованої технології виготовлення та кількості добового вживання).

---

[42] Vinderola G., et al. Integration of Postbiotics in Food Products through Attenuated Probiotics: A Case Study with Lactic Acid Bacteria in Bread. *Foods*. 2024. Vol. 13, № 13. P. 2042.

[43] Techo S., et al. Survival of probiotic Lactobacillus plantarum in bread baking and its postbiotic potential. *Journal of Food Science and Technology.* 2023. Vol. 60, № 4. P. 1120–1132.

[44] Cuevas-González P. F., et al. Role of lactic acid bacteria and yeasts in sourdough fermentation during breadmaking: Evaluation of postbiotic-like components and health benefits. *Frontiers in Nutrition.* 2022. Vol. 9. Art. 952435.

3.2. Клініко-біологічна оцінка впливу функціональних продуктів на видовий та кількісний склад мікробіому кишківника та загальний стан здоров'я підлітків

Як було зазначено у методиці проведеного дослідження, продовж 2 тижнів респонденти вживали в доповнення до свого звичайного раціону виготовлений функціональний харчовий продукт:

1 група – Фруктове (яблучне) пюре;

2 група – Цільнозерновий хліб на хлібній заквасці (без заморожування закваски);

3 група – Цільнозерновий хліб на хлібній заквасці (з попереднім заморожуванням закваски).

Згідно проведених мікробіологічних досліджень вмісту мікрофлори кишківнику респондентів встановлена наявність лакто та біфідобактерій в різній кількості. Отримані усереднені результати дослідження наведені в табл. 2.

Таблиця 2

Усереднені результати мікробіологічних досліджень калу респондентів, КУО/ см^3 ($n = 10$, $M \pm m$)*

Респондент	До вживання функціонального продукту		Після вживання функціонального продукту	
	Лакто-бактерії	Біфідо-бактерії	Лакто-бактерії	Біфідо-бактерії
Респонденти 1 групи	$(1{,}0 \pm 0{,}1) \cdot 10^5$	$(1{,}0 \pm 0{,}2) \cdot 10^7$	$(1{,}0 \pm 0{,}1) \cdot 10^5$	$(1{,}0 \pm 0{,}1) \cdot 10^9$
Респонденти 2 групи	$<1 \cdot 10^5$	$(1{,}0 \pm 0{,}1) \cdot 10^9$	$(1{,}0 \pm 0{,}2) \cdot 10^8$	$(1{,}0 \pm 0{,}3) \cdot 10^{10}$
Респонденти 3 групи	$<1 \cdot 10^5$	$(1{,}0 \pm 0{,}1) \cdot 10^9$	$(1{,}0 \pm 0{,}2) \cdot 10^8$	$(1{,}0 \pm 0{,}2) \cdot 10^{10}$
Норма для підлітків	$1 \cdot 10^7 \div 1 \cdot 10^8$	$1 \cdot 10^9 \div 1 \cdot 10^{10}$	$1 \cdot 10^7 \div 1 \cdot 10^8$	$1 \cdot 10^9 \div 1 \cdot 10^{10}$

* M – середнє арифметичне; m – стандартна похибка середнього.

У результаті вживання запропонованих видів функціональних харчових продуктів, збагачених пробіотичними організмами, у кишківнику респондентів збільшився титр лакто та біфідобактерій. Зокрема у респондентів групи 2 та групи 3 збільшилась кількість колоній утворюючих одиниць (КУО) лактобактерій від $1 \cdot 10^5$ до $1 \cdot 10^8$ та стала відповідати нормам для підлітків. У тих самих респондентів також збільшилась кількість колоній біфідобактерій. Для респондентів групи 1 також покращились показники вмісту у кишківнику пробіотичних організмів, хоча і не так інтенсивно, як у попередніх.

Детальний аналіз отриманих даних дозволяє встановити закономірності впливу різних типів харчових матриць на динаміку мікробіоценозу кишківника.

Для дослідної групи 1, члени якої вживали яблучне пюре, збагачене пробіотичними організмами спостерігається ефект пребіотичної стимуляції. Попри те, що титр лактобактерій у цій групі залишився стабільним ($1 \cdot 10^5$ КУО/см³), спостерігалося значне зростання вмісту біфідобактерій – з $1 \cdot 10^7$ до $1 \cdot 10^9$ КУО/см³, що обґрунтовується високим вмістом пектинових речовин у яблучній сировині. Пектин виступає селективним пребіотичним субстратом, який не перетравлюється в тонкій кишці, а ферментується ендогенною мікрофлорою товстого кишківника, стимулюючи переважно ріст біфідобактерій. Таким чином, фруктове пюре з МКБ діє як синергічний продукт, що підтримує власну мікрофлору респондента.

Для респондентів, що додали до свого раціону цільнозерновий хліб на хлібній заквасці (Групи 2 та 3) встановлений пробіотичний та парапробіотичний потенціал, що підтверджується зростанням титру лактобактерій на три порядки (до $1 \cdot 10^8$ КУО/см³), що відповідає фізіологічній нормі. Важливим є те, що результати 2-ї та 3-ї груп майже ідентичні. Це доводить, що попереднє заморожування закваски не знижує функціональну цінність готового продукту. Високу ефективність хліба на заквасці можна пояснити поєднанням двох факторів – терморезистентністю метаболітів та ефекту крос-фідінгу. Тобто при випіканні хліба, навіть якщо частина клітин інактивується під час дії високих температур в процесі приготування, вони переходять у стан парапробіотиків, зберігаючи імуногенну активність клітинних стінок. Ефект крос-фідінгу в даному випадку полягає в тому, що метаболіти МКБ (молочна кислота, бутират) створюють сприятливе pH-середовище для росту супутніх біфідобактерій, що пояснює їх зростання до $1 \cdot 10^{10}$ КУО/см³.

Слід відмітити, що відсутність статистично значущої різниці між 2-ю та 3-ю групами підтверджує технологічну стійкість обраних штамів закваски VIVO та доцільність використання заморожених напівфабрикатів (заквасок) у промислових масштабах без втрати лікувально-профілактичних властивостей кінцевого продукту».

Проаналізувавши результати мікробіологічних досліджень калу респондентів можна прийти до висновку, що при вживанні функціонального продукту, збагаченого пробіотичними організмами, можна в повній мірі покращити стан кишечника. Абсолютно у всіх респондентів покращилися показники мікрофлори кишечника, кількість

лакто та біфідобактерій збільшилось. За результатами суб'єктивної оцінки, 85 % респондентів відзначили покращення загального самопочуття та підвищення енергійності після двотижневого курсу вживання продуктів.

Позитивна динаміка мікробіоценозу кишківника, зафіксована у всіх групах респондентів, має прямий кореляційний зв'язок із покращенням загального стану здоров'я підлітків. Збільшення титру пробіотичних мікроорганізмів до фізіологічної норми (10^8–10^{10} КУО/см³) забезпечує реалізацію оздоровчих ефектів.

Зростання популяції лакто- та біфідобактерій сприяє активації синтезу імуноглобулінів класу А (IgA) та інтерферонів, що проявляється в посиленні імунного захисту. Для підлітків, які проживають в умовах високого техногенного навантаження, це є критично важливим фактором підвищення неспецифічної резистентності організму до сезонних вірусних та бактеріальних інфекцій.

Відзначене респондентами покращення процесів травлення та зникнення симптомів диспепсії (метеоризму, відчуття важкості), підтверджується відновленням ферментативної активності мікрофлори. Вживання цільнозернового хліба на заквасці та фруктового пюре забезпечило надходження комплексу вітамінів групи В та К, синтезованих МКБ in situ, що позитивно впливає на нервову систему та когнітивні здібності школярів. Крім того поєднання пектинових речовин (у пюре) та метаболітів пробіотиків забезпечує ефективне зв'язування та виведення ендотоксинів, що сприяє зниженню рівня системного запалення, яке часто проявляється у підлітковому віці через дерматологічні проблеми та швидку втомлюваність.

Таким чином, впровадження розроблених функціональних продуктів у щоденний раціон дозволяє не лише нівелювати наслідки нераціонального харчування, а й створити надійний фундамент для гармонійного фізичного розвитку підлітків, підвищуючи їхній загальний життєвий тонус та працездатність.

Проведене порівняння отриманих експериментальних даних із результатами світових досліджень дозволяє підтвердити наукову обґрунтованість нашої гіпотези.

По-перше, встановлений нами факт позитивного впливу цільнозернового хліба на титр лактобактерій (Групи 2 та 3), попри термічну обробку закваски, корелює з останніми дослідженнями G. Vinderola та ін. (2024)[45].

[45] Vinderola G., et al. Integration of Postbiotics in Food Products through Attenuated Probiotics: A Case Study with Lactic Acid Bacteria in Bread. *Foods*. 2024. Vol. 13, № 13. P. 2042.

Автори доводять, що інактивовані нагріванням пробіотики у складі хліба здатні модулювати мікробіоту та імунну відповідь не менш ефективно, ніж живі культури. Це підтверджує концепцію парапробіотиків, згідно з якою фрагменти клітинних стінок бактерій зберігають свою біологічну активність навіть після випікання.

По-друге, наші дані щодо збереження функціональності продукту після заморожування закваски (Група 3) узгоджуються з висновками S. Techo та ін. (2023)[46]. У їхніх дослідженнях було показано, що пробіотичні штами *Lactobacillus plantarum* демонструють високу стійкість до стресових факторів (заморожування/відтавання), а їхній постбіотичний потенціал (метаболіти, що утворилися в заквасці) залишається стабільним. Це спростовує застарілу думку про те, що функціональними можуть бути лише продукти, які не піддавалися термічній чи кріогенній обробці.

По-третє, виявлений селективний ріст біфідобактерій при вживанні яблучного пюре (Група 1) підтверджує висновки P. F. Cuevas-González (2022)[47] щодо синергізму рослинних полісахаридів та мікробіоти. Наші результати доводять, що фруктова матриця є не просто носієм, а активним пребіотичним фактором, який підсилює дію внесених МКБ.

Водночас, на відміну від деяких досліджень, які акцентують увагу лише на виживаності клітин in vitro, наше дослідження на респондентах-підлітках продемонструвало реальний фізіологічний відгук (покращення травлення та загального тонусу). Це підкреслює високу біодоступність розроблених продуктів та їхню адаптивність до потреб молодого організму, що росте в умовах техногенного навантаження.

Також, серед рекомендацій щодо підтримки стабільної роботи шлунково-кишкового тракту, а отже загального самопочуття підлітків, слід навести наступні:

– потрібно застосовувати різноманітне та збалансоване меню харчування, багате фруктами та овочами, харчовими волокнами та здоровими жирами при цьому необхідно обмежувати вживання оброблених продуктів, з великою кількістю цукру та насичених жирів, оскільки це може впливати на склад мікрофлори кишечнику;

[46] Techo S., et al. Survival of probiotic Lactobacillus plantarum in bread baking and its postbiotic potential. *Journal of Food Science and Technology*. 2023. Vol. 60, № 4. P. 1120–1132.

[47] Cuevas-González P. F., et al. Role of lactic acid bacteria and yeasts in sourdough fermentation during breadmaking: Evaluation of postbiotic-like components and health benefits. *Frontiers in Nutrition*. 2022. Vol. 9. Art. 952435.

– необхідно вживати достатню кількість рідини, оскільки вода важлива для правильного функціонування кишечнику та підтримки рухів кишечника;

– регулярна фізична активність може сприяти нормалізації рухів кишечника та підтримувати загальне здоров'я організму;

– стрес може впливати на функціонування кишечника, тому необхідно практикувати методи релаксації, такі як йога, медитація, або глибокий дихальний вдих;

– слід уникати зайвого вживання антибіотиків, які можуть порушити нормальний склад мікрофлори кишечника, та вживати антибіотики тільки за рекомендацією лікаря. Необхідно проводити регулярні медичні обстеження та консультації з лікарем для визначення стану здоров'я кишківника та вчасного виявлення можливих проблем.

ВИСНОВКИ

Відповідно до принципів European Pillar of Social Rights та підходу "Health in All Policies", харчування визнається важливою складовою комплексного, профілактично орієнтованого та людиноцентрованого підходу. Поєднання фізичної активності та біохімічно обґрунтованих харчових рекомендацій сприяє підвищенню резильєнтності, покращенню якості життя та зниженню ризику хронізації різноманітних станів, що особливо актуально для поствоєнної України.

Підтверджено критичну необхідність корекції раціону підліткового населення України, враховуючи тенденції до зниження рівня здоров'я та високе техногенне навантаження. Обґрунтовано, що найбільш ефективним інструментом такої корекції є впровадження функціональних продуктів щоденного вжитку, ключовою складовою яких є молочнокислі бактерії, які здатні покращувати травлення, позитивно впливати на роботу шлунково-кишкового тракту виробляючи метаболіти, здатні впливати на мозок та імунітет.

Згідно з проведеними дослідженнями встановлено, що всі виготовлені харчові продукти, які попередньо збагачені пробіотичними культурами молочнокислих бактерій, варто відносити до функціональних, адже в них, незалежно від температурного режиму та технології їхнього виготовлення, залишається значна кількість клітин МКБ. Крім того, досліджені харчові продукти у своєму складі містять харчові волокна, вітаміни, натуральні цукри, які не руйнуються під час низькотемпературної обробки (на прикладі йогурту та фруктового пюре). Хліб на заквасці, виготовлений із цільнозернового борошна, може стати корисною функціональною основою в щоденному харчовому раціоні кожної людини.

Доведено доцільність використання багатокомпонентних заквасок (на прикладі «Пробіо Йогурт VIVO») у виробництві хлібобулочних та фруктових виробів. Встановлено, що концентрація МКБ у готових продуктах (яблучне пюре, цільнозерновий хліб) не нижче 10^5 КУО/см³ у поєднанні з метаболітами бродіння забезпечує високий функціональний відгук. Доведено, що попри термічну обробку, цільнозерновий хліб на заквасці зберігає функціональність за рахунок концепції парапробіотиків. Клітинні стінки інактивованих бактерій зберігають імуногенну активність, взаємодіючи з рецепторами імунної системи шлунково-кишкового тракту. Виявлено синергетичний ефект пектинових речовин та метаболітів МКБ, що підсилює детоксикаційні властивості фруктового пюре.

Доведено ефективний спосіб зміцнення здоров'я підлітків через поліпшення роботи кишково-шлункового тракту та нормалізації мікрофлори кишківника шляхом двотижневого вживання власноруч виготовлених функціональних харчових продуктів, додатково збагачених пробіотичними організмами. Дослідження, проведені серед здобувачів освіти комунального закладу «Ліцей № 31» Кам'янської міської ради, підтвердили, що додаткове введення до раціону харчування функціональних харчових продуктів дозволяє відновити титр лакто- та біфідобактерій у підлітків до фізіологічної норми (лактобактерій до $1 \cdot 10^8$, біфідобактерій до $1 \cdot 10^{10}$ КУО/см³), що корелює з покращенням загального самопочуття, травлення та зміцненням адаптаційного потенціалу організму. Встановлено, що вживання до 200 грам на день функціональних харчових продуктів, збагачених МКБ, сприяє позитивним змінам у роботі шлунково-кишкового тракту людини.

Загалом, збереження нормальної роботи кишківника вимагає комплексного підходу до здорового способу життя та раціонального харчування. Вживання функціональних харчових продуктів, додатково збагачених пребіотиками та пробіотиками, може підтримувати збалансовану мікрофлору. Запропонована лінійка функціональних харчових продуктів дозволить без обтяжувань харчового раціону людини підтримувати здоровий спосіб життя та мати щоденний збалансований харчовий раціон зі смачних та корисних продуктів для людей будь-якої вікової категорії незалежно від медичних застережень. Розроблені технології рекомендовані для масового впровадження у шкільне харчування та домашнє використання як доступний засіб профілактики дисбіозів та зміцнення імунітету молоді.

Практична реалізація результатів дослідження та впровадження розроблених технологій (цільнозернового хліба та фруктового пюре

із заданим мікробіологічним профілем) повністю відповідає цілям Операційного плану заходів з реалізації Стратегії реформування системи шкільного харчування на 2025–2027 роки (Розпорядження КМУ № 1216-р) та корелюють із засадами державної політики у сфері громадського здоров'я (згідно із Законом № 2573-IX), спрямованої на зміцнення резильєнтності населення та формування здорового середовища життєдіяльності підлітків через оптимізацію харчування. Це дозволяє рекомендувати запропоновані продукти для включення до оновленого шкільного меню як ефективний засіб профілактики аліментарних захворювань та зміцнення імунітету підліткового населення в умовах сучасних викликів

Отже, додаткове введення пробіотичних культур МКБ до складу харчових продуктів щоденного раціону підтверджує практичну цінність проведеної роботи. Доведення функціональних ознак у розглянутих продуктах, незалежно від температурного режиму їхнього виготовлення, указує на наукову новизну дослідження.

АНОТАЦІЯ

У роботі досліджено теоретичні та практичні аспекти створення функціональних харчових продуктів, збагачених поліштамними концентратами молочнокислих бактерій. Обґрунтовано актуальність впровадження функціональних харчових продуктів у раціон підлітків України, враховуючи дані ВООЗ та МОЗ щодо зростання аліментарно-залежних захворювань у техногенно навантажених регіонах.

Наукова новизна полягає у розширенні уявлень про механізми впливу МКБ на організм через концепції постбіотиків та парапробіотиків. Доведено, що використання закваски «Пробіо Йогурт VIVO" дозволяє не лише забезпечити високий титр життєздатних клітин (10^9 КУО/см^3), а й зберегти імуномодулюючу активність продукту навіть після термічної обробки (на прикладі хлібобулочних виробів) завдяки ефекту мікроінкапсуляції в харчовій матриці.

Запропоновано технологічні етапи виробництва функціонального йогурту, яблучного пюре та хліба, що сприяють зміцненню бар'єрної функції кишечника та загальної резистентності організму. Результати дослідження можуть бути використані для оптимізації шкільного харчування та оздоровлення населення в екологічно несприятливих умовах в рамках затвердженої кабінетом Міністрів України Стратегії реформування системи шкільного харчування на 2025–2027 роки та затвердженого президентом Закону України «Про систему громадського здоров'я», який введено в дію з 1 жовтня 2023 року.

Література

1. Рівень фізичного розвитку підлітків. Ознаки гармонійного розвитку. *Народна освіта.* URL: http://narodna-osvita.com.ua/601-rven-fzichnogo-rozvitku-pdltkv-oznaki-garmonynogo-rozvitku-hlopchikv-dvchatok.html

2. Diet, nutrition and the prevention of chronic diseases: report of a Joint WHO/FAO Expert Consultation. Geneva : World Health Organization, 2003. 149 p. (WHO Technical Report Series ; № 916). URL: https://apps.who.int/iris/handle/10665/42665

3. Про затвердження Рекомендацій щодо здорового харчування дорослих, дітей та підлітків : Наказ Міністерства охорони здоров'я України від 03.09.2017 р. № 1073. URL: https://moz.gov.ua/uk/documents/pro-zatverdzhennja-rekomendacij-schodo-zdorovogo-harchuvannja-doroslih-ditej-ta-pidlitkiv

4. Comprehensive mental health action plan 2013–2030. Geneva : World Health Organization, 2021. 38 p. URL: https://www.who.int/publications/i/item/9789240031029

5. Про затвердження операційного плану заходів з реалізації Стратегії реформування системи шкільного харчування на 2025–2027 роки : Розпорядження Кабінету Міністрів України від 07 листоп. 2025 р. № 1216-р. URL: https://www.kmu.gov.ua/npas/1216-07112025

6. Розвиток підлітків. Фізичний розвиток людини. Дистанційна підтримка освіти. URL: https://disted.edu.vn.ua/courses/learn/2253

7. Фізичний розвиток підлітків. URL: http://poradumo.pp.ua/sport-i-yiza/1349-fzichniy-rozvitok-pdltkv.html

8. Вплив харчування на фізіологічні показники підлітків. URL: http://medbib.in.ua/vliyanie-pitaniya-psihofiziologicheskie.html

9. Грибан В. Г. Валеологія : підручник. Київ : Центр учбової літератури, 2008. 214 с.

10. Functional foods. European Commission. Luxembourg : Publications Office of the European Union, 2010. 24 p.

11. Функціональні продукти харчування як перспективні лікувально-профілактичні та дієтичні засоби / О. Калюжная та ін. *Загальна теорія здоров'я та здоров'язбереження* : колект. монографія. Харків, 2017. С. 185–194.

12. Пектинові речовини та їх роль у харчуванні : монографія / О. В. Самохвал та ін. Харків : ХДУХТ, 2012. 164 с.

13. Slavin J. Fiber and Prebiotics: Mechanisms and Health Benefits. *Nutrients*. 2013. Vol. 5, № 4. P. 1417–1435. URL: https://doi.org/10.3390/nu5041417

14. Gill C., et al. Dietary fibre in healthy ageing: focus on the role of the gut microbiota. *Proceedings of the Nutrition Society.* 2021. Vol. 80, № 1. P. 95–104.

15. Гусєв М. В., Мінєєва Л. А. Мікробіологія : підручник. Київ : Нова книга, 2003. 464 с.

16. Фармацевтична біотехнологія : посібник / Д. В. Моісєєв та ін. ; за ред. Д. В. Моісєєва. Харків : НФАУ, 2019. 293 с.

17. Сирохман І. В., Завгородня В. М. Товарознавство харчових продуктів функціонального призначення : навч. посіб. Київ : Центр учбової літератури, 2009. 544 с.

18. Сайт офіційного виробника та продавця заквасок VIVO. URL: https://www.zakvaski.com/production/probio-yogurt-vivo.html

19. Кухтин М. Д. Лабораторний практикум з мікробіології. URL: https://elartu.tntu.edu.ua/bitstream/lib/41178/1/Kukhtyn_Laboratornyy_praktykum_2023.pdf

20. Salminen S., et al. The International Scientific Association for Probiotics and Prebiotics (ISAPP) consensus statement on the definition and scope of postbiotics. *Nature Reviews Gastroenterology & Hepatology*. 2021. Vol. 18. P. 649–667. DOI: https://doi.org/10.1038/s41575-021-00440-6.

21. Wang S., et al. Postbiotics and their biotherapeutic potential for chronic disease and their feature perspective: a review. *Frontiers in Microbiomes.* 2025. Vol. 4. Art. 1489339.

22. Piqué N., Berlanga M., Miñana-Galbis D. Postbiotics: Alternative to Probiotics in Cardiovascular Diseases and Metabolic Disorders. *Molecules*. 2024. Vol. 29, № 11. P. 25–38.

23. Зеленський Д., Непошивайленко Н. Оцінка харчового продукту на титр молочнокислих бактерій (на прикладі розсільного сиру типу «Бринза»). *Youth Pharmacy Science* : матеріали І Всеукр. наук.-практ. конф. (м. Харків, 27–29 квіт. 2021 р.). Харків, 2021. С. 446.

24. Непошивайленко Н., Корнієнко І., Анацький А. Удосконалення рецептури приготування розсільного сиру типу «Бринза» з підвищеним титром молочнокислих бактерій. *Збірник наукових праць Дніпровського державного технічного університету (технічні науки).* 2022. Т. 1, № 40. С. 164–174.

25. Корнієнко І. Дослідження впливу ультразвукових коливань на титр молочнокислих бактерій тіста. *Біотехнологія XXI століття* : тези XV Всеукр. наук.-практ. конф. (м. Київ, КПІ). Київ, 2021. С. 55.

26. Полончук Л., Корнієнко І. Адаптивні властивості молочнокислих бактерій до несприятливих умов та факторів навколишнього середовища. *Авіація в XXI столітті* : тези X Всесвіт. конгр. (м. Київ, НАУ). Київ, 2022. С. 4.1.46–4.1.49.

27. Функціонально-технологічні властивості заморожених напівфабрикатів, кріоконсервація готових хлібопродуктів / І. Корнієнко та ін. Київ : НАУ, 2021. 54 с.

28. Korniienko I., Kuznietsova O., Garkava K. Formation of individual human health: modern biotechnological trends in the use of probiotic microorganisms in functional sourdough bakery. *Scientific and educational dimensions of natural sciences* : Scientific monograph. Riga, Latvia, 2023. P. 375–403. URL: https://doi.org/10.30525/978

29. Непошивайленко Н., Корнієнко І. Актуальні проблеми індивідуального здоров'я підлітків та застосування сучасних біотехнологій виробництва функціональних продуктів харчування з метою їх вирішення. *Actual problems of natural sciences: modern scientific discussions* : Collective monograph. Riga: Izdevniecība "Baltija Publishing", 2020. P. 391–408.

30. Пошук поживного середовища для розвитку молочнокислих бактерій з метою виготовлення функціонального харчового продукту / Н. Непошивайленко та ін. *Біотехнологія XXI століття* : матеріали XVII Міжнар. наук.-практ. конф. (м. Київ, КПІ). Київ, 2023. С. 141–143.

31. ДСТУ 4343:2004. Йогурти. Загальні технічні умови. Київ : Держспоживстандарт України, 2005. 12 с. URL: https://online.budstandart.com/ua/catalog/doc-page.html?id_doc=72933

32. ДСТУ 4084-2001. Консерви фруктові пюреподібні для дитячого харчування. Технічні умови. Київ : Держстандарт України, 2002. 18 с. URL: https://online.budstandart.com/ua/catalog/doc-page?id_doc=72407

33. ДСТУ-П 4588:2006. Вироби хлібобулочні для спеціального дієтичного споживання. Загальні технічні умови. Київ : Держспоживстандарт України, 2007. 10 с. URL: https://dnaop.com/html/33877/doc-ДСТУ-П_4588_2006

34. ДСТУ 7517:2014. Хліб із пшеничного борошна. Загальні технічні умови. Київ : Мінекономрозвитку України, 2015. 15 с. URL: http://online.budstandart.com/ua/catalog/docpage.html?id_doc=77546]

35. Vinderola G., et al. Integration of Postbiotics in Food Products through Attenuated Probiotics: A Case Study with Lactic Acid Bacteria in Bread. *Foods*. 2024. Vol. 13, № 13. P. 2042.

36. Techo S., et al. Survival of probiotic Lactobacillus plantarum in bread baking and its postbiotic potential. *Journal of Food Science and Technology*. 2023. Vol. 60, № 4. P. 1120–1132.

37. Cuevas-González P. F., et al. Role of lactic acid bacteria and yeasts in sourdough fermentation during breadmaking: Evaluation of postbiotic-like

components and health benefits. *Frontiers in Nutrition.* 2022. Vol. 9. Art. 952435.

38. Про систему громадського здоров'я : Закон України від 06.09.2022 р. № 2573-IX. URL: https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/2573-20

Information about the authors:
Neposhyvailenko Nataliia Oleksandrivna,
Candidate of of Technical Sciences, Associate Professor,
Dniprovskyi State Technical University
2, Dniprobudivska street, Kamianske, 51900, Ukraine

Korniienko Iryna Mykhailivna,
Candidate of of Technical Sciences, Associate Professor,
State University "Kyiv Aviation Institute"
1, Lyubomyr Huzar avenue, Kyiv, 03058, Ukraine

CHAPTER 18

BIOLOGICALLY ACTIVE COMPOUNDS OF *CURCUMA LONGA L.* AND ASPECTS OF THEIR APPLICATION

Sachuk A. T., Konechna R. T.
DOI https://doi.org/10.30525/978-9934-26-654-6-18

INTRODUCTION

Curcuma longa L., known worldwide as a source of valuable golden spice, is a perennial herbaceous plant that has been the basis of traditional Asian medicine for centuries and is now the focus of modern science. Its unique morphological structure with a characteristic orange-yellow rhizome acts as a natural laboratory in which highly active polyphenolic compounds are synthesized. The key component of this plant is diferuloylmethane, which, thanks to its universal therapeutic properties, is becoming the basis for modern treatment strategies for many diseases. Modern pharmacology pays special attention to the ability of this polyphenol to modulate complex inflammatory pathways. Preclinical studies confirm its high efficacy in reducing airway obstruction, which is crucial in the treatment of asthma and allergies. This mechanism is based on the precise inhibition of enzymes such as sPLA2 and cyclooxygenase-2 (COX-2), as well as the blocking of key signalling kinases (ERK, p38 MAPK, JNK) responsible for the progression of pathological changes. In addition, polyphenol plays an important role in preventing irreversible remodelling of lung tissue by reducing the activity of MMP-9 metalloproteinase and decreasing the expression of proteins associated with fibrosis. Beyond its medicinal aspects, turmeric has enormous potential in the fields of healthcare, agriculture and economic innovation. The cultivation of this plant, of which India remains the leading producer, is key to the economic revival of many regions. Treating *Curcuma longa* as a high value-added commodity stimulates the local economy, creates jobs and strengthens export potential. Its rich history and status as a "golden spice" also attract tourists interested in cultural heritage and natural healing methods.

1. Characteristics of *Curcuma Longa. L.*

Curcuma Longa. L. is perennial herbaceous plant distinguished be its unique morphological structure. The basis of the plant is a strong cylindrical rhizome? Which has a characteristic orange-yellow hue in its core. From this underground system grows an egg-shaped, sessile stem, which serves as the central axis for the formation of leaves. The leaves are basal and grow in dense clusters, often reaching a total height of up to 1.5 meters, including the petiole and blade. These leaves have a membranous base that transitions into a simple, oblong-lanceolate lade that tapers to its starting point. The flowering part of the plant manifests itself in a basal inflorescence in the form of a cluster. This structure is supported by a peduncle that can reach 15 cm or more. The flower inflorescence, approximately 10–15 cm × 6 cm in size, is crowned with bright pink terminal bracts, while the lower flower bracts are pale green in colour. The flowers themselves are full and fragrant, regular, zygomorphic. The are protected be two different types of bracts: sterile ones, which form a bright pink cone (5–8 cm long) at the top, and fertile ones, which are pale green in colour, 4–6 cm in size, noticeably curved and rounded at the ends. At their base, the bracts and bracteoles merge to form small sacs in which the flowers develop. The calyx consists of three sepals connected be three small, uneven lobes. The corolla consists of three fused petals forming a tube about 3 cm long, its upper half is funnel-shaped with pale pink blades. The rear blade is egg-shaped, concave a curved above the fertile stamens. The androecium has five stamens (2+3). In the inner ring, two parts merges to form a lip-like staminode, leaving only one stamen, which is fertile. This stamen is characterized by a short filament and an anther that has grown at the base. The gynoecium has three carpels with a lower, syncarpous, three-nested ovary. The pistil is thread-like, and the stigma is bilobed. The plant forms a spherical capsule containing elongated or egg-shaped seeds[1].

Origin and distribution. *Curcuma Longa*, which originates from the tropical landscapes of Southeast Asia, has established itself as a staple of Asian heritage. It is widely used in Chine, Bangladesh and Southeast Asia, serving a triple function: as a delicious food additive, a natural preservative and a powerful colouring agent. Today, it is grown worldwide in regions such as Taiwan, Sri Lanka, Myanmar, Nigeria, Australis, Peru, Jamaica, and various countries in the West Indies, the Caribbean, and Latin America. However, India retains its undisputed dominance in the global market, accounting for

[1] Pratima Dolase, Vivek Chaudhari. Review on Cultivation Practices of Haridra (Curcuma Longa Linn.). *International Journal of Ayurveda and Pharma Research*. 2024. P. 56–61. DOI: https://doi.org/10.47070/ijapr.v12i9.3394 (date of access: 25.10.2025).

approximately 78 % of world production, making it the leading producer, consumer and exporter of this spice. In India, the agricultural base of this industry is in states such as Odisha, Andhra Pradesh, Maharashtra, Tamil Nadu, Kerala, Assam, Bihar and Bengal. Erode, in Tamil Nadu, historically known as the 'Yellow City' or 'City of Turmeric', is recognized as the world's leading centre for production and trade. Sangli, a city in Maharashtra, ranks second among the largest trading centres and plays an important role in the distribution of spices. In particular, the variety grown in the state of Kerala, known commercially as Alleppey Finger Turmeric (AFT), is recognized as the highest quality on the market[2].

Cultivation. Curcuma grows in warm and humid climates and requires fertile, well-drained soil rich in humus for optimal growth. Turmeric is sensitive to excess water and does not tolerate waterlogged areas. Although it prefers alkaline soils, it demonstrates the ability to adapt to a wide pH range, from 5.0 to 7.5. the key factor determining its development is temperature. The planting phase is best carried out at a temperature of 30–35 °C, and rhizome formation can take place at 30–35 °C, 20–25 °C and 18–20 °C.

The soil preparation process is labour-intensive and involves four to six cycles of digging and ploughing to properly loosen the soil. The necessary fertilisers are applied during the last ploughing. The method of field formation depends on the soil structure. On porous soil, wide beds are formed, separated be water channels. On non-porous soils, ridges and furrows are formed, and the rhizomes are placed in shallow pits on the ridges or on the sides.

Curcuma Longa is usually propagated vegetatively using rhizomes, as growing from seed is economically unprofitable. The best seed material is considered to be the mother rhizomes. They can be planted whole or divided into smaller pieces, provided that each piece has at least one bud. However, using whole mother rhizomes guarantees stronger and better plant growth.

The planting period is usually from mid-April to August, depending on local weather conditions and the specific variety. The traditional method of propagation has certain limitations, as the two-month dormant period allows only one plant to be obtained from each rhizome, forcing growers to reserve a significant portion of the harvest for future sowing. This plant has a high demand for nutrients, so farmers use manure as the main fertilizer, supplemented by two applications of peanut meal.

[2] Gopinath H., Karthikeyan K. Turmeric: A condiment, cosmetic and cure. *Indian Journal of Dermatology, Venereology, and Leprology*. 2018. Vol. 84, no. 1. P. 16. DOI: https://doi.org/10.4103/ijdvl.ijdvl_1143_16 (date of access: 25.10.2025).

Proper irrigation is critical in three phases: germination, formation of rhizomes and their swelling. In regions with abundant rainfall, cultivation is carried out during the rainy season, while in others, artificial irrigation is necessary. Even a few days without access to water can drastically reduce yields.

The plant is considered mature when the above-ground part, including the base of the stem, is completely dry. Depending on the variety, harvesting takes place several months after planting. After ripening, dry leaves are cut off at ground level. To facilitate the digging up of the rhizomes, it is recommended to water the soil. The next step is to clean the rhizomes and divide them into smaller round pieces and parts. Often, a small part of the field is left untouched in order to collect seed material the following month[3].

Storage, processing and preparation. Cleaned rhizomes intended for sowing required special care. They are stored in shaded areas, protected from the sun by the leaves of the plant itself or stacked in piles and covered with soil mixed with cow manure. In some regions, these piles are additionally sprinkled with ash and periodically moistened with water to maintain optimal humidity.

The rest of the harvest, after preliminary hardening, is stored in large quantities directly at the collection sites. Before the onset in sealed underground pits, which are lined and covered with insulating materials such as reed grass (*Saccharum spontaneum*) or date palm leaves. These storage facilities are only opened after the heavy rains have ended.

The first stage of processing is to boil the rhizomes in water until they soften. This process is key to destroying pests and must be carried out with extreme care. Boiling time varies depending on the region and ranges from 30 minutes to as long as 6 hours. An interesting traditional element is the addition of a small amount of cow manure to the water, as it is believed that ats alkalinity gives the final product a better, deeper colour. An effective technique is to use perforated troughs immersed in cauldrons, which allows up to 700 kg of raw materials to be processed in about 30 minutes, significantly saving time and fuel. After boiling, the rhizomes are gradually cooled and then dried. Traditionally, they are laid out in the sun for 10–15 days, turning them regularly to ensure even drying. An alternative is electric dryers that maintain a constant temperature between 50 °C and 60 °C. Once dried, the

[3] Choudhary A. K., Rahi S. Organic cultivation of high yielding turmeric (Curcuma longa L.) cultivars: a viable alternative to enhance rhizome productivity, profitability, quality and resource-use efficiency in monkey–menace areas of north-western Himalayas. *Industrial Crops and Products*. 2018. Vol. 124. P. 495–504. DOI: https://doi.org/10.1016/j.indcrop.2018.07.069 (date of access: 25.10.2025).

hard rhizomes are rubbed against rough surfaces or trampled to remove the outer layer of pores and skin. The next step is polishing, which gives the product an aesthetic appearance. This is done using special machines consisting of a large horizontal polishing drum, which is driven manually or mechanically. The drum is protected by a fine wire mesh that prevents small fragments from falling out. This process takes about 30 minutes for a batch weighing 32 kg. Complete polishing results in a weight loss of 5–8 %, while partial polishing limits this loss to 2–3 %. The final stage is to give the rhizomes an intense colour, for which two main methods are used. The first is a dry method, which involves mixing the rhizomes with chemicals, mainly chromium. However, it is not recommended due to the harmful effects of chemical dyes on health. Therefore, the wet method is usually preferred. In this case, a solution of golden dye is mixed with water and sprayed onto the semi-polished rhizomes, and then rubbed in. Another, more complex process involves coating the dried rhizomes with a special emulsion containing castor paste, alum, sodium bisulphate, sulphuric acid and turmeric powder. After applying this mixture, the product is dried again in the sun for about 7 days. The finished, fully processed *Curcuma longa* is characterized by its brittle structure and intense bright yellow colour[4].

Content of biologically active substances. Turmeric rhizomes, known in India under the traditional names 'Haridra' or 'Haldi', are an extremely complex mixture of nutrients and active compounds. They contain carbohydrates (69.4 %), proteins (6.3 %), fats (5.1 %), minerals (3.5 %), moisture (23.1 %), as well as volatile and non-volatile oils. The most important components of the rhizome can be divided into two groups:

– Curcuminoids: curcumin (curcumin I), demethoxycurcumin (curcumin II), bis-demethoxycurcumin (curcumin III) and cyclocurcumin (curcumin IV).

– Essential oils (5–8 %): a mixture of sesquiterpene ketones and alcohols, including d-sabinene (0.6 %), α-phellandrene (1 %), cineol (1 %), and borneol.

It is the curcuminoids that are responsible for the plant's characteristic intense yellow colour. In turn, essential oils give the plant its characteristic aromatic smell and taste. Due to their antioxidant, anti-inflammatory and analgesic properties, these oils are widely used not only in medicine, but also in aromatherapy and the perfume industry. Curcumin is the main component, accounting for aput 70 % of all curcuminoids. It is considered the primary

[4] Pratima Dolase, Vivek Chaudhari. Review on Cultivation Practices of Haridra (Curcuma Longa Linn.). *International Journal of Ayurveda and Pharma Research*. 2024. P. 56–61. DOI: https://doi.org/10.47070/ijapr.v12i9.3394 (date of access: 25.10.2025).

source of the golden pigment and most of the therapeutic properties. It is estimated to constitute between 2 % and 5 % of the total mass of turmeric[5].

Pharmacological action and aspects of use. *Curcuma longa*, often referred to as the 'golden spice', has an extremely rich history of use dating back to ancient times. For centuries, the inhabitants of the Indian subcontinent have used it not only as an integral part of their diet, but also, above all, as a traditional medicine for treating a wide range of diseases. Importantly, centuries of practice have not revealed any negative side effects associated with its prolonged use. Historical documents show that turmeric has been present in India for at least 6,000 years, used as medicine, cosmetic, culinary spice and natural dye. The first mentions of it in the Western world appeared in Marco Polo's 1280 writings describing his travels to China and India. Although it reached Europe in the 13th century thanks to Arab merchants, its true 'discoverer' for the West is considered to be the Portuguese navigator Vasco da Gama, who reached India in the 15th century. Due to its unique colour and aroma, turmeric was given the name 'Indian saffron' in Europe[6].

Chinese medicine has been using the rhizomes of this plant for over a millennium to purify the blood, lower blood pressure, relieve stomach pain, and as a natural antibiotic and antiviral agent. In both Indian and Chinese traditions, turmeric has been used as an anti-inflammatory agent to treat toothache and chest pain, menstrual disorders, stomach and liver diseases, wound healing and scar lightening. Historically in India, it has also been used for skin diseases, upper respiratory tract infections, and joint and digestive tract problems. Although its preservative properties were widely recognized due to its antioxidant action, its health benefits, including promoting digestion, suppressing excessive appetite and treating jaundice, were no less important elements of traditional therapy.

Turmeric is currently advertised as an effective dietary supplement that helps treat many diseases, such as arthritis, digestive disorders (dyspepsia), respiratory tract infections, allergies (e. g., hay fever) and even depression. Scientific studies confirm that oral administration of turmeric alleviates hay fever symptoms such as sneezing, itching and nasal congestion. For digestive disorders, the main active ingredient is curcumin, which has an effect similar to Omeprazol, a popular drug for high acidity. The therapeutic effects of the plant are due to the presence of biologically active molecules, primarily curcuminoids. They interact with flavonoids, phenolic compounds, vitamin C and carotenoids, enhancing antioxidant activity, promoting collagen

[5] Gopinath H., Karthikeyan K. Turmeric: A condiment, cosmetic and cure. *Indian Journal of Dermatology, Venereology, and Leprology*. 2018. Vol. 84, no. 1. P. 16. DOI: https://doi.org/10.4103/ijdvl.ijdvl_1143_16 (date of access: 25.10.2025).

[6] Ibid.

synthesis and strengthening antibacterial barriers. In addition to their antiseptic and appetite-stimulating effects, extracts and oils from *Curcuma longa* are used in cosmetology they have photoprotective properties for matte and dark skin, so they are used in creams and suspensions to provide natural sun protection at a level of approximately SPF-20[7, 8, 9, 10].

2. Characteristics of curcumin

Curcumin. Curcumin, also known by its chemical name difurloilmethane, is a hydrophobic polyphenol obtained from the rhizomes of perennial herbs of the genus Curcuma, belonging to the ginger family (Zingiberaceae). Although it is found in many species, such as Curcuma amada, Curcuma zedoaria, Curcuma aromatica, and Curcuma raktakanta, Curcuma longa is its most popular source. Typically, rhizomes contain 3 % to 5 % curcuminoid derivatives, which include curcumin, demethoxycurcumin, and bis-demethoxycurcumin, whose formulas can be seen in Figure 1.

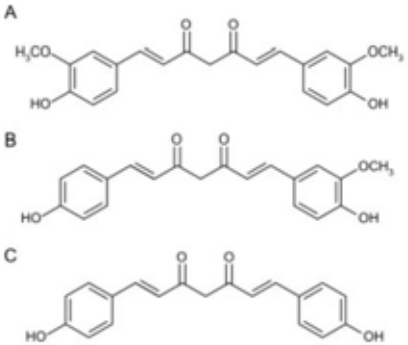


Fig. 1. Curcumin (A), demethoxycurcumin (B), bis-demethoxycurcumin (C)

[7] Anti-Inflammatory, Wound Healing, and Anti-Diabetic Effects of Pure Active Compounds Present in the Ryudai Gold Variety of Curcuma longa / M. Z. Islam et al. *Molecules*. 2024. Vol. 29, no. 12. P. 2795. DOI: https://doi.org/10.3390/molecules29122795 (date of access: 28.10.2025).

[8] Daily J. W., Yang M., Park S. Efficacy of Turmeric Extracts and Curcumin for Alleviating the Symptoms of Joint Arthritis: A Systematic Review and Meta-Analysis of Randomized Clinical Trials. *Journal of Medicinal Food*. 2016. Vol. 19, no. 8. P. 717–729. DOI: https://doi.org/10.1089/jmf.2016.3705 (date of access: 28.10.2025).

[9] Effect of Phenolic Compounds Extracted from Turmeric (Curcuma longa L.) and Ginger (Zingiber officinale) on Cutaneous Wound Healing in Wistar Rats / C. Bouchama et al. *Cosmetics*. 2023. Vol. 10, no. 5. P. 137. DOI: https://doi.org/10.3390/cosmetics10050137 (date of access: 25.10.2025).

[10] Research Progress on Sesquiterpenoids of Curcumae Rhizoma and Their Pharmacological Effects / T. Cui et al. *Biomolecules*. 2024. Vol. 14, no. 4. P. 387. DOI: https://doi.org/10.3390/biom14040387 (date of access: 28.10.2025).

In its pure form, difurylomethan is a crystalline compound with an intense orange-yellow colour. The World Health Organisation (WHO) has set the acceptable daily intake (ADI) of this substance as a food additive at 0–3 mg/kg of body weight.

The chemical structure of curcumin is defined as [1,7-bis(4-hydroxy-3-methoxyphenyl)-1,6-heptadieno-3,5-dione], molecular formula is $C_{21}H_{20}O_6$, molecular weight is 368.38 daltons, and melting point is 183 °C. Curcumin is practically insoluble in water at acidic and neutral pH. It dissolves in polar and non-polar organic solvents, alkaline solutions (bases) and in extremely acidic environments, such as glacial acetic acid.

An extremely important chemical phenomenon in the case of curcumin is keto-enolic tautomerism (Figure 2), which depends on the acidity of the environment. In acidic and neutral environments, the stable ketone form predominates, while in alkaline environments, the compound converts to the enolic form.

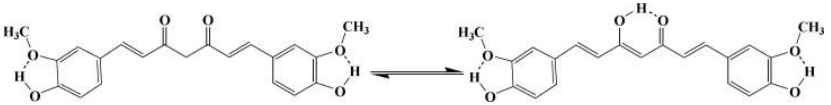


Fig. 2. Keto-enolic tautomerism of curcumin

The enolic form is further stabilised by intramolecular hydrogen bonding, enhanced by resonance, which affects the reactivity and antioxidant properties of this polyphenol.

In aqueous environments, the key factor determining the stability of diferuloylmethane is pH, which manifests itself in the form of a noticeable change in the colour of solutions. When the pH falls below 1, the solution turns red, which is explained by the presence of the protonated form of the compound. In a wide pH range from 1 to 7, molecules in neutral form predominate, giving the solution a characteristic yellow colour. In turn, exceeding a pH value of 7.5 leads to a transition to an orange-red hue[11].

Studies of curcumin degradation kinetics conducted in various buffer systems (pH 1–11) at a temperature of 31.5 °C showed that this process occurs according to second-order kinetics. In the pH range of 7.0–7.8, changes in phosphate buffer concentration had no significant effect on the rate of decay.

[11] Physical and Chemical Stability of Curcumin in Aqueous Solutions and Emulsions: Impact of pH, Temperature, and Molecular Environment / M. Kharat et al. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*. 2017. Vol. 65, no. 8. P. 1525–1532. DOI: https://doi.org/10.1021/acs.jafc.6b04815 (date of access: 24.01.2026).

Other analyses conducted at 37 °C in 0.1 M citrate, phosphate, and carbonate buffers (pH 3–10) at constant ionic strength indicated first-order kinetics. Three decomposition products were identified during these processes: vanillin, ferulic acid (FK), and feruloylmethane. Detailed chemical structures of all decomposition products are provided in the technical documentation (Figure 3).

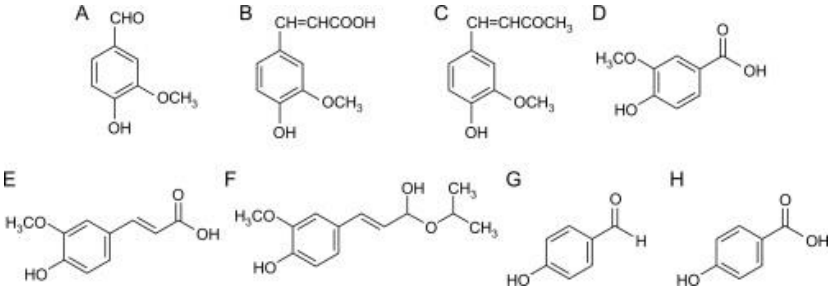


Fig. 3. Curcumin degradation products: (A) vanillin, (B) ferulic acid, (C) feruloyl methane, (D) vanillic acid, (E) ferulic aldehyde, (F) 4-vinylguaiacol, (G) p-hydroxybenzaldehyde, (H) p-hydroxybenzoic acid

Vanillin is usually the main degradation product, but at pH values between 7 and 10 and a temperature of 31.5 °C, ferulic acid and feruloylmethane dominate as key degradation products[12].

TLC. The identification and quantification of the active components of turmeric rhizome is based on precise chromatographic techniques that allow three main compounds to be distinguished: curcumin, demethoxycurcumin and bis-demethoxycurcumin.

According to the official recommendations of the European Pharmacopoeia, the main tool for verifying the identity of raw materials is thin-layer chromatography (TLC). This procedure requires the preparation of solutions (test and reference, containing fluorescein and thymol) in methanol. An ice acetic acid system with toluene in a volume ratio of 80:20 is used as the mobile phase. After development and drying, the plate is sprayed with a solution of dichloroquinone chloride in isopropanol and then exposed to ammonia vapour. The presence of difurylmethane and demethoxycurcumin

[12] Stability of curcumin in buffer solutions and characterization of its degradation products / Y.-J. Wang et al. *Journal of Pharmaceutical and Biomedical Analysis*. 1997. Vol. 15, no. 12. P. 1867–1876. DOI: https://doi.org/10.1016/s0731-7085 (96)02024-9 (date of access: 24.01.2026).

is confirmed by the appearance of two characteristic yellow-brown or brown bands. They are located between the blue-violet zone of thymol and the yellow zone of fluorescein (visible at the bottom of the plate)[13].

HPLC. High-performance liquid chromatography (HPLC) is a technique for determining the components of turmeric rhizome and is used to analyse: diferuloylmethane, demethoxycurcumin and bis-demethoxycurcumin.

Scientists have conducted many studies on the use of HPLC for curcuminoids to find the best technique, so here are a few methods for performing HPLC.

Using the HPLC method on a C18 column, four different varieties of turmeric were analysed with detection at 425 nm using three solvents (methanol, 2 % AcOH and acetonitrile) to determine the percentage composition of the fractions: Differuloylmethane – 1.06 ± 0.061 to 5.65 ± 0.040, Demethoxycurcumin – 0.83 ± 0.047 to 3.36 ± 0.040 and Bis-demethoxycurcumin – 0.42 ± 0.036 to 2.16 ± 0.06. The total content of curcuminoids in the samples studied ranged from 2.34 ± 0.171 to 9.18 ± 0.232 %[14].

In order to obtain high resolution and repeatability of results, a validated isocratic method was developed, which is characterised by the following steps. Sample preparation – dissolution of the extract in acetonitrile and dilution with a solution of this solvent. The mobile phase is a mixture of acetonitrile and acetic acid (40:60). An Alltima C18 column was used, with a flow rate of 2.0 ml/min, a temperature of 33 °C, and UV detection at 425 nm. This method allows for accurate concentration determination with a very high recovery rate and low detection limits, which is necessary in pharmaceutical research[15].

Due to the low bioavailability of curcumin, innovative forms of administration are being developed, such as micellar powders based on casein (CMP) and poloxamer (PMP). The analysis of diferuloylmethane trapped in these polymer matrices required the creation of a C18 column (250×4 mm, 5 mm) with a diode array detector. A mixture of acetonitrile

[13] Lestari M. L. A. D., Indrayanto G. Curcumin. *Profiles of Drug Substances, Excipients and Related Methodology*. 2014. P. 113–204. DOI: https://doi.org/10.1016/b978-0-12-800173-8.00003-9 (date of access: 24.01.2026).

[14] Jayaprakasha G. K., Jagan Mohan Rao L., Sakariah K. K. Improved HPLC Method for the Determination of Curcumin, Demethoxycurcumin, and Bisdemethoxycurcumin. *Journal of Agricultural and Food Chemistry.* 2002. Vol. 50, no. 13. P. 3668–3672. DOI: https://doi.org/10.1021/jf025506a (date of access: 24.01.2026).

[15] A simple isocratic HPLC method for the simultaneous determination of curcuminoids in commercial turmeric extracts / W. Wichitnithad et al. *Phytochemical Analysis*. 2009. Vol. 20, no. 4. P. 314–319. DOI: https://doi.org/10.1002/pca.1129 (date of access: 24.01.2026).

and water with added acetic acid was used as the mobile phase for isocratic elution at a flow rate of 1.0 mL/min and detection at 421 nm. The method demonstrated excellent linearity in the ranges of 2–20 and 10-50 mg/ml, confirming its effectiveness in the accurate dosing of polyphenol in modern medical preparations[16].

Fluorimetric identification method. Given the growing importance of diferuloylmethane, a key task for scientists has been to develop quality control methods that are faster and more sensitive than routinely used liquid chromatography (HPLC).

An innovative, rapid spectrofluorimetric method was developed on 96-well microplates, which allows for mass analysis of samples in a short time. The limit of detection (LOD) for the fluorimetric method was only 7 and 15 ng/ml, and the linear range is 15 to 3900 ng/ml. This method has been successfully used to study diferuloylmethane encapsulated in solid lipid nanoparticles (SLNs) and chitosan nanoparticles (Chi-NPs)[17].

Another breakthrough is the use of copper nanoclusters stabilised with polyvinylpyrrolidone (PVP-Cu NCs) as fluorescent probes. This technique is based on the phenomenon of FRET (Fluorescence Resonance Energy Transfer), where the excitation/emission spectra of nanoclusters coincide with the absorption spectrum of curcumin, leading to the quenching of the probe's fluorescence. The reduction in fluorescence lifetime after the addition of the analyte allows for the accurate determination of diferuloylmethane in the range of 0.1–10 mg/ml^{-1} with a detection limit of 21 mg/ml^{-1}. This method is characterised by exceptional selectivity in the analysis of real samples[18].

A simple and sensitive fluorimetric method using acetonitrile as a solvent was developed for the early stages of drug development. The excitation wavelength is set at 397 nm and the emission wavelength at 508 nm. The method has demonstrated excellent linearity and accuracy, allowing effective

[16] Analytical method for the determination of curcumin entrapped in polymeric micellar powder using HPLC / H. Yusuf et al. *Journal of Basic and Clinical Physiology and Pharmacology*. 2021. Vol. 32, no. 4. P. 867–873. DOI: https://doi.org/10.1515/jbcpp-2020-0491 (date of access: 24.01.2026).

[17] A Sensitive Spectrofluorimetric Method for Curcumin Analysis / A. B. Sravani et al. *Journal of Fluorescence*. 2022. DOI: https://doi.org/10.1007/s10895-022-02947-w (date of access: 24.01.2026).

[18] FRET-based fluorometry assay for curcumin detecting using PVP-templated Cu NCs / Z. Yao et al. *Talanta*. 2021. Vol. 223. P. 121741. DOI: https://doi.org/10.1016/j.talanta.2020.121741 (date of access: 24.01.2026).

control of the content of diferuloylmethane in suspensions of lipid and polymer nanocapsules[19].

Anti-inflammatory and antioxidant effects. These processes are inextricably linked. Inflammatory cells release reactive oxygen and nitrogen species (ROS and RNS) at the site of infection or injure, which directly induces oxidative stress. On the other hand, these reactive molecules activate intracellular signalling cascades the enhance the expression of pro-inflammatory genes. This mechanism underlies many chronic diseases, such as Alxheimer's, Parkinson's, multiple sclerosis, cancer, diabetes, and cardiovascular and respiratory diseases[20, 21].

A key mediator in this process is tumour necrosis factor α (TNF-α), whose action is strictly regulated by the transcription factor NF-κB. NF-κB is activated by a wide range of stimuli: from inflammatory cytokines and viruses, through environmental pollution (tobacco smoke, UV radiation), to psychological and dietary stress (high glucose levels, fatty acids). Curcumin has the unique ability to block NF-κB activation induced be these factors, making it a powerful therapeutic agent[22].

From chemical point of view, diferuloylmethane is a classic phenolic antioxidant that interrupts radical chain reactions. Its unique structure, containing double carbon-carbon bonds, an β-diketone group and phenyl rings with hydroxyl substituents, allows it to effectively donate hydrogen atoms from phenolic groups to neutralize free radicals[23].

As a lipophilic compound, curcumin is incorporated into cell membranes, protecting them from lipid peroxidation, mainly due to its ability to bind iron. In addition, it significantly increases the activity of the body's protective

---

[19] Development and validation of a fluorimetric method to determine curcumin in lipid and polymeric nanocapsule suspensions / L. Mazzarino et al. *Brazilian Journal of Pharmaceutical Sciences*. 2010. Vol. 46, no. 2. P. 219–226. DOI: https://doi.org/10.1590/s1984-82502010000200008 (date of access: 24.01.2026).

[20] Kocaadam B., Şanlier N. Curcumin, an active component of turmeric (Curcuma longa), and its effects on health. *Critical Reviews in Food Science and Nutrition*. 2015. Vol. 57, no. 13. P. 2889–2895. DOI: https://doi.org/10.1080/10408398.2015.1077195 (date of access: 24.01.2026).

[21] Ak T., Gülçin İ. Antioxidant and radical scavenging properties of curcumin. *Chemico-Biological Interactions*. 2008. Vol. 174, no. 1. P. 27–37. DOI: https://doi.org/10.1016/j.cbi.2008.05.003 (date of access: 24.01.2026).

[22] Boroumand N., Samarghandian S., Hashemy S. I. Immunomodulatory, anti-inflammatory, and antioxidant effects of curcumin. *Journal of Herbmed Pharmacology*. 2018. Vol. 7, no. 4. P. 211–219. DOI: https://doi.org/10.15171/jhp.2018.33 (date of access: 24.01.2026).

[23] On the Antioxidant Mechanism of Curcumin: Classical Methods Are Needed To Determine Antioxidant Mechanism and Activity / L. R. C. Barclay et al. *Organic Letters*. 2000. Vol. 2, no. 18. P. 2841–2843. DOI: https://doi.org/10.1021/ol000173t (date of access: 24.01.2026).

enzymes, such as superoxide dismutase (SOD), catalase (CAT), and glutathione peroxidase (GPx).

Curcumin is particularly important for protecting the reproductive system, where it restores the redox balance necessary for normal sperm function, protecting their DNA and mitochondria. In vital organs such as the drain, liver and kidneys, curcumin mitigates the effects of chronic stress[24].

Antibacterial effect. Modern research confirms that curcumin has a broad spectrum of action against Gram-positive and Gram-negative bacteria, including drug-resistant strains such as methicillin-resistant *Staphylococcus aureus* (MRSA)[25].

Curcumin can act in several ways, for example, due to its lipophilic structure, it has the ability to directly embed itself into the lipid bilayers of bacteria. Curcumin molecules penetrate deep into the membranes, leading to their permeability and loss of structural integrity. Damage to the membrane barrier facilitates the penetration of other drugs into the bacterial cell, which explains the strong synergistic effect of curcumin when used in combination therapies.

The key bacteriostatic mechanism of curcumin is the inhibition of cell division. Curcumin directly binds to the FtsZ protein, which is necessary for the formation of the Z-ring during cytokinesis. By increasing the activity of the GTPase of the FtsZ protein, curcumin interrupts the process of its polymerisation, preventing the reproduction of bacteria.

The next method involves curcumin's ability to induce processes in bacteria that resemble programmed cell death (apoptosis). Treatment of cells with curcumin at MIC (minimum inhibitory concentration) leads to a sharp accumulation of reactive oxygen species (ROS), membrane depolarisation and calcium ion influx, and the expression of the RecA protein, a mediator of the apoptotic response, increases under the influence of curcumin. Strains lacking this protein (RecA) show significantly greater resistance to the action of polyphenol. Curcumin also weakens bacterial DNA repair mechanisms by suppressing LexA protein expression.

Curcumin effectively counteracts the formation of biofilms that protect bacteria from antibiotics and the immune system. This compound disrupts intercellular communication between bacteria, limiting their ability to adapt

[24] Boroumand N., Samarghandian S., Hashemy S. I. Immunomodulatory, anti-inflammatory, and antioxidant effects of curcumin. *Journal of Herbmed Pharmacology*. 2018. Vol. 7, no. 4. P. 211–219. DOI: https://doi.org/10.15171/jhp.2018.33 (date of access: 24.01.2026).

[25] Yun D. G., Lee D. G. Antibacterial activity of curcumin via apoptosis-like response in Escherichia coli. *Applied Microbiology and Biotechnology*. 2016. Vol. 100, no. 12. P. 5505–5514. DOI: https://doi.org/10.1007/s00253-016-7415-x (date of access: 24.01.2026).

and settle on host receptors. It inhibits the adhesion of bacteria to surfaces, which is key in the prevention of chronic infections.

An innovative application of this polyphenol is its use as a photosensitiser in photodynamic therapy. When exposed to light with a wavelength of 455-460 nm, curcumin generates additional portions of ROS, destroying the proteins, lipids and DNA of pathogens. Treatment of bacteria with curcumin affects the level of nitric oxide and the kynurenine pathway, depriving them of nutrients necessary for growth, such as L-tryptophan[26].

Arthritis. Osteoarthritis (OA) is a chronic disease characterized by progressive destruction of joint cartilage, in which inflammation and oxidative stress play a key role. Due to the lack of effective causal drugs, diferuloylmethane is attracting increasing attention as a promising therapeutic alternative.

Mechanistic studies conducted on human and animal chondrocytes have shown that this polyphenol has a multi-vector protective effect. Although it does not directle stimulate cell proliferation at physiological doses, it effectively counteractsthe destructive effects of interleukin-1β (IL-1β). At the cellular level, curcumin prevents chondrocyte death by increasing the expression of anti-apoptotic proteins (Bcl-2, Bcl-XL) and inhibiting the caspase-3 cascade, prevents inflammation-induced inhibition of chondrocyte differentiation, by increasing the level of type II collagen and β1-integrin. Treatment with curcumin also restores the normal appearance of cell organelles, preventing swelling of the mitochondria and endoplasmic reticulum.

The mechanism of action in osteochondrosis is based in the anti-inflammatory effect of the compound, mainly through its effect on the NF-κB system. Curcumin prevents movement of the p65 subunits of this factor to the cell nucleus, blocking the activation of genes responsible for inflammation. This leads to a significant reduction in the levels of matrix metalloproteinases, which destroy cartilage, cyclooxygenase-2 (COX-2) and prostaglandin E2 (PGE-2) enzymes, and pro-inflammatory cytokines such as IL-6 and IL-1β. Studies involving patients confirm the high clinical efficacy of curcuminoid supplementation. In double-blind studies at doses of 1000-1500 mg per day (often with the addition of piperine for better absorption), the following was observed: reduction in pain and stiffness, efficacy compared to ibuprofen, and a better safety profile, as patients who used curcumin reported significantly fewer gastrointestinal disturbances.

[26] The Natural Product Curcumin as an Antibacterial Agent: Current Achievements and Problems / C. Dai et al. *Antioxidants*. 2022. Vol. 11, no. 3. P. 459. DOI: https://doi.org/10.3390/antiox11030459 (date of access: 24.01.2026).

Wound healing. The optimal wound healing agent should perform several key functions: protect tissues from bacterial infections, reduce inflammation, and stimulate cell proliferation to repair damaged structures. Diferuloylmethane has all these properties, combining anti-inflammatory, anti-infective and antioxidant effects. Free radicals are considered the main cause of inflammation during healing, so the antioxidant potential of this compound is key to protecting newly formed tissues.

Studies have shown that curcumin significantly accelerates the repair processes in several ways: it actively participates in the formation of new granulation scar tissue and collagen deposition, supports the restoration of the epithelial layer and increases the density of blood vessels at the site of injury, and stimulates the cells responsible for the elasticity and mechanical strength of the skin.

Inflammation is a necessary phase of healing, but its uncontrolled course leads to tissue destruction. Curcumin optimises this process mainly by suppressing the production of key cytokines: tumour necrosis factor alpha (TNF-α) and interleukin-1 (IL-1). The key mechanism here is the blocking of the transcription factor NF-κB, where curcumin inhibits kinases, i.e. affects the AKT, PI3K and IKK pathways, which normally activate NF-κB.

Studies using COP polymer dressings impregnated with curcumin have shown a reduction in the expression of pAKT and P13K kinases in rats, which directly reduced inflammation[27].

Antiallergic and antiasthmatic agent. Since turmeric has traditionally been used in Asian medicine to treat itching and skin diseases, its active compounds are now the subject of intensive research in the context of treating allergies and bronchial asthma.

A key aspect of curcumin's anti-allergic action is its ability to inhibit the release of histamine from mast cells. For example, it has been found to regulate Th2 responses, where it reduces the production of IgE antibodies and inflammatory cytokines, leading to the suppression of excessive immune system reactions. This polyphenol also has the ability to inhibit the activity of Th17 cells while promoting the development of regulatory Treg cells, which restores immune balance in the airways.

Regarding the treatment of asthma, in studies on animal models induced with ovalbumin (OVA), curcumin at doses of 20 to 100 mg/kg demonstrated efficacy comparable to corticosteroids. A significant reduction in inflammatory cell infiltration, cup cell (mucus-producing) hypertrophy, and alveolar

[27] Curcumin as a wound healing agent / D. Akbik et al. *Life Sciences*. 2014. Vol. 116, no. 1. P. 1–7. URL: https://doi.org/10.1016/j.lfs.2014.08.016 (date of access: 24.01.2026).

oedema was observed. Diferuloylmethane inhibited the expression of NF-κB, HSP70 protein, and kinases such as ERK and JNK, which directly leads to less airway obstruction. Curcumin also increased the levels of aquaporins (AQP-1 and AQP-5), which in turn helps to reduce pulmonary oedema by improving water transport in tissues.

However, due to the low solubility of curcumin in water, there are some problems with its delivery to the body, so researchers are currently improving these methods. For example, nasal application is highly effective in suppressing bronchial spasms and can be used in the form of drops, quickly improving breathing comfort after an asthma attack. There are also lipid nanoparticles (SLNs) and dry emulsions that significantly increase the absorption of the compound from the gastrointestinal tract, more effectively suppressing airway hyperresponsiveness.

Curcumin also has a protective effect in cases of viral infections (RSV), as it suppresses virus replication and enhances the barrier function of the nasal epithelium without exhibiting cytotoxicity. In acute lung injury (ALI/ARDS), it protects lung tissue from damage caused by oxidative stress and toxins (e.g., paraquat)[28, 29, 30, 31].

Anticancer effect. Diferuloylmethane is also considered a chemopreventive and therapeutic agent due to its pleiotropic action, i.e. its ability to simultaneously affect multiple molecular targets and signalling pathways. Its efficacy has been confirmed in studies of breast, lung, prostate, head and neck, and brain cancers.

Curcumin has the ability to stop the uncontrolled proliferation of cancer cells by reducing the levels of cyclins and cyclin-dependent kinases (CDK4, cyclin D1), which leads to the arrest of the cell cycle. It further inhibits the expression of the epidermal growth factor receptor (EGFR), which is often overactive in adenocarcinomas, and reduces the levels of endothelial nitric oxide synthase and nitric oxide (NO) itself, which promote tumour growth.

---

[28] Shahid M. T., Khair-ul-Bariyah S. Anti-Asthmatic and Cardioprotective Efficacy of Curcumin-A Review. *International Journal of Scientific Research in Knowledge*. 2014. Vol. 2, no. 5. P. 215–223. DOI: https://doi.org/10.12983/ijsrk-2014-p0215-0223 (date of access: 24.01.2026).

[29] Kocaadam B., Şanlier N. Curcumin, an active component of turmeric (Curcuma longa), and its effects on health. *Critical Reviews in Food Science and Nutrition*. 2015. Vol. 57, no. 13. P. 2889–2895. DOI: https://doi.org/10.1080/10408398.2015.1077195 (date of access: 24.01.2026).

[30] Immunomodulatory and Anti-Inflammatory Potential of Curcumin for the Treatment of Allergic Asthma: Effects on Expression Levels of Pro-inflammatory Cytokines and Aquaporins / H. Shahid et al. *Inflammation*. 2019. Vol. 42, no. 6. P. 2037–2047. DOI: https://doi.org/10.1007/s10753-019-01066-2 (date of access: 24.01.2026).

[31] Kurup V. P., Barrios C. S. Immunomodulatory effects of curcumin in allergy. *Molecular Nutrition & Food Research*. 2008. Vol. 52, no. 9. P. 1031–1039. DOI: https://doi.org/10.1002/mnfr.200700293 (date of access: 24.01.2026).

This polyphenol also restores balance in cell death processes, which is key in the fight against treatment-resistant tumours. It increases the levels of pro-apoptotic proteins (e.g., Bax) while simultaneously suppressing anti-apoptotic proteins (Bcl-2) and activates enzymatic cascades that lead to the destruction of cancer cells. In cells resistant to classical apoptosis, curcumin induces severe endoplasmic reticulum stress and leads to so-called mitotic catastrophe, in particular by reducing survivin levels.

For growth, a tumour needs new blood vessels and the ability to penetrate tissues. Curcumin blocks these processes by Inhibiting vascular growth factors (reducing levels of VEGF, VEGFR2 and basic fibroblast growth factor (b-FGF)) or degrading the extracellular matrix, where it inhibits the activity of matrix metalloproteinases (MMP-2 and MMP-9), preventing the migration and metastasis of cancer cells.

Chronic inflammation is also the basis of many tumours, and curcumin effectively interrupts this process by switching off the NF-κB pathway, which is constitutively active in tumours, reducing the levels of inflammatory cytokines (IL-1β, IL-6, IL-8, TNF-α) and inhibiting the activity of COX-2 and 5-LOX, limiting the formation of pro-inflammatory eicosanoids.

Despite its enormous potential, the use of diferuloylmethane faces obstacles such as low bioavailability due to poor water solubility and rapid metabolism, and hydrophobicity, as the molecule often binds to the membrane without reaching the interior of the cytoplasm. To overcome these difficulties, science is developing delivery systems such as nanomicelles, liposomes, and structural modifications that increase selective toxicity to cancer cells while protecting healthy tissues (chemoprotective effect)[32, 33, 34].

CONCLUSIONS

Curcuma longa L. is a perennial plant belonging to the *Zingiberaceae* family, characterised by a specific morphology, the key element of which is a cylindrical underground stem with intense pigmentation, which is the main repository of bioactive polyphenols. Diferuloylmethane plays a central

[32] Curcumin and its promise as an anticancer drug: An analysis of its anticancer and antifungal effects in cancer and associated complications from invasive fungal infections / J. Chen et al. *European Journal of Pharmacology*. 2016. Vol. 772. P. 33–42. DOI: https://doi.org/10.1016/j.ejphar.2015.12.038 (date of access: 24.01.2026).

[33] Biological and therapeutic activities, and anticancer properties of curcumin / D. Perrone et al. *Experimental and Therapeutic Medicine*. 2015. Vol. 10, no. 5. P. 1615–1623. DOI: https://doi.org/10.3892/etm.2015.2749 (date of access: 24.01.2026).

[34] Tomeh M., Hadianamrei R., Zhao X. A Review of Curcumin and Its Derivatives as Anticancer Agents. *International Journal of Molecular Sciences*. 2019. Vol. 20, no. 5. P. 1033. DOI: https://doi.org/10.3390/ijms20051033 (date of access: 24.01.2026).

role in the chemical profile of the raw material, which, due to its molecular structure, exhibits a wide range of pharmacological activities, including strong antioxidant, anti-inflammatory and immunomodulatory properties. Preclinical studies show that this compound effectively inhibits the processes of pulmonary fibrosis and airway obstruction by precisely modifying signaling pathways and reducing the expression of metalloproteinases and structural proteins. Despite its high therapeutic potential, the clinical efficacy of *Curcuma longa* extracts is determined by their physicochemical instability. Diferuloylmethane undergoes rapid degradation in an alkaline environment and under the influence of UV radiation and high temperatures, which necessitates the application of strict technological standards in the extraction and storage process. *Curcuma longa* is a valuable raw material for modern pharmacy and cosmetology, but optimising its use requires further research into the crystalline polymorphism of active substances in order to improve their stability and bioavailability in biological systems.

SUMMARY

This paper presents an in-depth analysis of the botanical, biochemical and pharmacological characteristics of *Curcuma longa L.* The main focus is on a detailed description of the morphological structure of the plant, the peculiarities of its cultivation and a critical analysis of the properties of its main bioactive component, diferuloylmethane.

The aim of the work is to systematise scientific data on the morphology of *Curcuma longa L.* and to study in detail the therapeutic effect of diferuloylmethane on pathophysiological processes in the body. It also aims to identify the molecular mechanisms of action of the plant and determine the factors that influence the stability of its active substances in order to optimise their use in medicine.

The novelty of the study lies in its focus on the molecular aspect of the interaction of diferuloylmethane with key signalling pathways and enzymatic systems. The work substantiates the relevance of using turmeric as a means of preventing airway obstruction and pulmonary fibrosis. Particular attention is paid to the problem of low physicochemical stability of the active substance under the influence of light, alkaline environment and heat treatment, which is critical for pharmaceutical development.

Curcuma longa L. is a strategically important plant for modern phytotherapy. It has been proven that diferloylmethane has a pronounced ability to inhibit inflammatory mediators and regulate the expression of structural proteins, which makes it indispensable in the treatment of chronic inflammatory diseases. The work also highlights the economic importance of

the plant, considering it a highly valuable product for the agro-industrial sector and export potential, contributing to the development of local economies.

The results of the study confirm that *Curcuma longa L.* is a unique source of bioactive polyphenols with a powerful therapeutic profile. It has been established that the effectiveness of preparations based on it directly depends on compliance with technological processing standards, since active compounds undergo significant degradation at high temperatures. Further research should be aimed at increasing the bioavailability of diferuloylmethane, which will allow the full potential of the 'golden spice' to be realised in modern pharmacology and industry.

Bibliography

1. Ak T., Gülçin İ. Antioxidant and radical scavenging properties of curcumin. *Chemico-Biological Interactions*. 2008. Vol. 174, no. 1. P. 27–37. DOI: https://doi.org/10.1016/j.cbi.2008.05.003 (date of access: 24.01.2026).

2. Analytical method for the determination of curcumin entrapped in polymeric micellar powder using HPLC / H. Yusuf et al. *Journal of Basic and Clinical Physiology and Pharmacology*. 2021. Vol. 32, no. 4. P. 867–873. DOI: https://doi.org/10.1515/jbcpp-2020-0491 (date of access: 24.01.2026).

3. Antibacterial Action of Curcumin against Staphylococcus aureus: A Brief Review / S.-Y. Teow et al. *Journal of Tropical Medicine*. 2016. Vol. 2016. P. 1–10. DOI: https://doi.org/10.1155/2016/2853045 (date of access: 24.01.2026).

4. Anti-Inflammatory, Wound Healing, and Anti-Diabetic Effects of Pure Active Compounds Present in the Ryudai Gold Variety of Curcuma longa / M. Z. Islam et al. *Molecules*. 2024. Vol. 29, no. 12. P. 2795. DOI: https://doi.org/10.3390/molecules29122795 (date of access: 24.01.2026).

5. A Sensitive Spectrofluorimetric Method for Curcumin Analysis / A. B. Sravani et al. *Journal of Fluorescence*. 2022. DOI: https://doi.org/10.1007/s10895-022-02947-w (date of access: 24.01.2026).

6. A simple isocratic HPLC method for the simultaneous determination of curcuminoids in commercial turmeric extracts / W. Wichitnithad et al. *Phytochemical Analysis*. 2009. Vol. 20, no. 4. P. 314–319. DOI: https://doi.org/10.1002/pca.1129 (date of access: 24.01.2026).

7. Biological and therapeutic activities, and anticancer properties of curcumin / D. PERRONE et al. *Experimental and Therapeutic Medicine*. 2015. Vol. 10, no. 5. P. 1615–1623. DOI: https://doi.org/10.3892/etm.2015.2749 (date of access: 24.01.2026).

8. Boroumand N., Samarghandian S., Hashemy S. I. Immunomodulatory, anti-inflammatory, and antioxidant effects of curcumin. *Journal of Herbmed*

Pharmacology. 2018. Vol. 7, no. 4. P. 211–219. DOI: https://doi.org/10.15171/jhp.2018.33 (date of access: 24.01.2026).

9. Chin K.-Y. The spice for joint inflammation: anti-inflammatory role of curcumin in treating osteoarthritis. *Drug Design, Development and Therapy*. 2016. Volume 10. P. 3029–3042. DOI: https://doi.org/10.2147/dddt.s117432 (date of access: 24.01.2026).

10. Choudhary A. K., Rahi S. Organic cultivation of high yielding turmeric (Curcuma longa L.) cultivars: a viable alternative to enhance rhizome productivity, profitability, quality and resource-use efficiency in monkey–menace areas of north-western Himalayas. *Industrial Crops and Products*. 2018. Vol. 124. P. 495–504. DOI: https://doi.org/10.1016/j.indcrop.2018.07.069 (date of access: 25.10.2025).

11. Curcumin and its promise as an anticancer drug: An analysis of its anticancer and antifungal effects in cancer and associated complications from invasive fungal infections / J. Chen et al. *European Journal of Pharmacology*. 2016. Vol. 772. P. 33–42. DOI: https://doi.org/10.1016/j.ejphar.2015.12.038 (date of access: 24.01.2026).

12. Curcumin as a wound healing agent / D. Akbik et al. *Life Sciences*. 2014. Vol. 116, no. 1. P. 1–7. DOI: https://doi.org/10.1016/j.lfs.2014.08.016 (date of access: 24.01.2026).

13. Daily J. W., Yang M., Park S. Efficacy of Turmeric Extracts and Curcumin for Alleviating the Symptoms of Joint Arthritis: A Systematic Review and Meta-Analysis of Randomized Clinical Trials. *Journal of Medicinal Food*. 2016. Vol. 19, no. 8. P. 717–729. DOI: https://doi.org/10.1089/jmf.2016.3705 (date of access: 28.10.2025).

14. Development and validation of a fluorimetric method to determine curcumin in lipid and polymeric nanocapsule suspensions / L. Mazzarino et al. *Brazilian Journal of Pharmaceutical Sciences*. 2010. Vol. 46, no. 2. P. 219–226. DOI: https://doi.org/10.1590/s1984-82502010000200008 (date of access: 24.01.2026).

15. Effect of curcumin on rheumatoid arthritis: a systematic review and meta-analysis / H. Kou et al. *Frontiers in Immunology*. 2023. Vol. 14. DOI: https://doi.org/10.3389/fimmu.2023.1121655 (date of access: 24.01.2026).

16. Effect of Phenolic Compounds Extracted from Turmeric (Curcuma longa L.) and Ginger (Zingiber officinale) on Cutaneous Wound Healing in Wistar Rats / C. Bouchama et al. *Cosmetics*. 2023. Vol. 10, no. 5. P. 137. DOI: https://doi.org/10.3390/cosmetics10050137 (date of access: 25.10.2025).

17. FRET-based fluorometry assay for curcumin detecting using PVP-templated Cu NCs / Z. Yao et al. *Talanta*. 2021. Vol. 223. P. 121741. DOI: https://doi.org/10.1016/j.talanta.2020.121741 (date of access: 24.01.2026).

18. Gopinath H., Karthikeyan K. Turmeric: A condiment, cosmetic and cure. *Indian Journal of Dermatology, Venereology, and Leprology*. 2018. Vol. 84, no. 1. P. 16. DOI: https://doi.org/10.4103/ijdvl.ijdvl_1143_16 (date of access: 25.10.2025).

19. Immunomodulatory and Anti-Inflammatory Potential of Curcumin for the Treatment of Allergic Asthma: Effects on Expression Levels of Pro-inflammatory Cytokines and Aquaporins / H. Shahid et al. *Inflammation*. 2019. Vol. 42, no. 6. P. 2037–2047. DOI: https://doi.org/10.1007/s10753-019-01066-2 (date of access: 24.01.2026).

20. Jayaprakasha G. K., Jagan Mohan Rao L., Sakariah K. K. Improved HPLC Method for the Determination of Curcumin, Demethoxycurcumin, and Bisdemethoxycurcumin. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*. 2002. Vol. 50, no. 13. P. 3668–3672. DOI: https://doi.org/10.1021/jf025506a (date of access: 24.01.2026).

21. Kocaadam B., Şanlier N. Curcumin, an active component of turmeric (Curcuma longa), and its effects on health. *Critical Reviews in Food Science and Nutrition*. 2015. Vol. 57, no. 13. P. 2889–2895. DOI: https://doi.org/10.1080/10408398.2015.1077195 (date of access: 24.01.2026).

22. Kurup V. P., Barrios C. S. Immunomodulatory effects of curcumin in allergy. *Molecular Nutrition & Food Research*. 2008. Vol. 52, no. 9. P. 1031–1039. DOI: https://doi.org/10.1002/mnfr.200700293 (date of access: 24.01.2026).

23. Lestari M. L. A. D., Indrayanto G. Curcumin. *Profiles of Drug Substances, Excipients and Related Methodology*. 2014. P. 113–204. DOI: https://doi.org/10.1016/b978-0-12-800173-8.00003-9 (date of access: 24.01.2026).

24. On the Antioxidant Mechanism of Curcumin: Classical Methods Are Needed To Determine Antioxidant Mechanism and Activity / L. R. C. Barclay et al. *Organic Letters*. 2000. Vol. 2, no. 18. P. 2841–2843. DOI: https://doi.org/10.1021/ol000173t (date of access: 24.01.2026).

25. Physical and Chemical Stability of Curcumin in Aqueous Solutions and Emulsions: Impact of pH, Temperature, and Molecular Environment / M. Kharat et al. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*. 2017. Vol. 65, no. 8. P. 1525–1532. DOI: https://doi.org/10.1021/acs.jafc.6b04815 (date of access: 24.01.2026).

26. Pratima Dolase, Vivek Chaudhari. Review on Cultivation Practices of Haridra (Curcuma Longa Linn.). *International Journal of Ayurveda and Pharma Research*. 2024. P. 56–61. DOI: https://doi.org/10.47070/ijapr.v12i9.3394 (date of access: 25.10.2025).

27. Research Progress on Sesquiterpenoids of Curcumae Rhizoma and Their Pharmacological Effects / T. Cui et al. *Biomolecules*. 2024. Vol. 14,

no. 4. P. 387. DOI: https://doi.org/10.3390/biom14040387 (date of access: 28.10.2025).

28. Shahid M. T., Khair-ul-Bariyah S. Anti-Asthmatic and Cardioprotective Efficacy of Curcumin-A Review. *International Journal of Scientific Research in Knowledge*. 2014. Vol. 2, no. 5. P. 215–223. DOI: https://doi.org/10.12983/ijsrk-2014-p0215-0223 (date of access: 24.01.2026).

29. Stability of curcumin in buffer solutions and characterization of its degradation products / Y.-J. Wang et al. *Journal of Pharmaceutical and Biomedical Analysis*. 1997. Vol. 15, no. 12. P. 1867–1876. DOI: https://doi.org/10.1016/s0731-7085 (96)02024-9 (date of access: 24.01.2026).

30. The Natural Product Curcumin as an Antibacterial Agent: Current Achievements and Problems / C. Dai et al. *Antioxidants*. 2022. Vol. 11, no. 3. P. 459. DOI: https://doi.org/10.3390/antiox11030459 (date of access: 24.01.2026).

31. Tomeh M., Hadianamrei R., Zhao X. A Review of Curcumin and Its Derivatives as Anticancer Agents. *International Journal of Molecular Sciences*. 2019. Vol. 20, no. 5. P. 1033. DOI: https://doi.org/10.3390/ijms20051033 (date of access: 24.01.2026).

32. Yun D. G., Lee D. G. Antibacterial activity of curcumin via apoptosis-like response in Escherichia coli. *Applied Microbiology and Biotechnology*. 2016. Vol. 100, no. 12. P. 5505–5514. DOI: https://doi.org/10.1007/s00253-016-7415-x (date of access: 24.01.2026).

Information about the authors:
Sachuk Anastasiia Tarasivna,
3rd year Student majoring at the Department of Technology of Biologically Active Compounds, Pharmacy and Biotechnology,
Institute of Chemistry and Chemical Technology,
Lviv Polytechnic National University
12, Stepana Bandery street, Lviv, 79013, Ukraine

Konechna Roksolana Tarasivna,
Candidate of Pharmaceutical Sciences,
Associate Professor at the Department of Technology of Biologically Active Compounds, Pharmacy and Biotechnology,
Institute of Chemistry and Chemical Technology,
Lviv Polytechnic National University
12, Stepana Bandery street, Lviv, 79013, Ukraine

04
SECTION

PHYSICAL AND GEOGRAPHICAL RESEARCH

CHAPTER 19

LONG-TERM TEMPERATURE CHANGE IN UKRAINE (1900–2021): TRENDS, VARIABILITY AND SCENARIOS

Boychenko S. H., Maidanovych N. M.
DOI https://doi.org/10.30525/978-9934-26-654-6-19

INTRODUCTION

Human influence on the climate system is now firmly established, with greenhouse-gas emissions from energy production, land-use changes, and consumption patterns driving a sustained rise in global mean temperature[1, 2]. Recent assessments indicate that global surface temperature has already exceeded the pre-industrial baseline by more than 1 °C, and the last decade has been marked by an exceptional sequence of record-warm years[3]. The global signal manifests regionally through shifts in the frequency of temperature extremes, changes in seasonal regimes, and altered spatial gradients of warming climate[4, 5].

Ukraine provides a valuable setting for examining these processes because it lies at the intersection of Atlantic-European influences and continental air-mass regimes. The country exhibits pronounced spatial heterogeneity in temperature variability shaped by geography and atmospheric circulation[6]. Observations indicate an overall warming background, accompanied by

[1] IPCC, 2023: Summary for Policymakers. Climate Change 2023: Synthesis Report. Contribution of Working Groups I, II and III to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change / Core Writing Team, H. Lee and J. Romero (eds.). Geneva : IPCC, 2023. P. 1–34. DOI: 10.59327/IPCC/AR6–9789291691647.001.

[2] Climate Change 2021 – The Physical Science Basis. Working Group I Contribution to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Cambridge University Press, 2023. P. 553–672. DOI: 10.1017/9781009157896.006.

[3] WMO. Provisional State of the Global Climate. 2022. URL: https://reliefweb.int/report/world/wmo–provisional–state–global–climate–2022 (accessed on 15 January 2026).

[4] Hegerl G. C., Brönnimann S., Schurer A., Cowan T. The early 20th–century warming: Anomalies, causes, and consequences. *Wiley Interdisciplinary Reviews: Climate Change*. 2018. Vol. 9, № 4. e522. DOI: 10.1002/wcc.522.

[5] Nita I. A., Sfîcă L., Voiculescu M., Birsan M. V., Micheu M. M. Changes in the global mean air temperature over land since 1980. *Atmospheric Research*. 2022. Vol. 279. 106392. DOI: 10.1016/j.atmosres.2022.106392.

[6] Клімат України / за ред. В. М. Ліпінського, В. А. Дячука, В. М. Бабіченко. Київ : Вид-во Раєвського, 2003. 344 с.

a decreasing likelihood of extremely cold conditions and an increasing occurrence of anomalously warm episodes[7, 8]. At the same time, substantial interannual variability persists, making it essential to distinguish long-term changes from circulation-driven fluctuations.

While global and regional modelling ensembles provide indispensable context for future projections[9, 10], long observational records remain fundamental for diagnosing regional climate change. Extended series establish a historical baseline, allow detection of changes in the seasonal cycle and extremes, and support the evaluation of modelling approaches. For Ukraine, early instrumental measurements available for some locations add further value by extending the perspective beyond the twentieth century.

Against this background, the present work examines the spatiotemporal behavior of surface air temperature over Ukraine with a focus on long-term change and the transformation of the seasonal cycle. In addition, we assess a semi-empirical modelling approach for estimating average annual surface air temperature over the lowland (plain) part of Ukraine by comparing modelled estimates with observed values. This emphasis reflects the need for transparent, computationally efficient tools that can complement more resource–intensive numerical modelling frameworks in climate impact studies and applied environmental planning.

Materials and Methods. This study relies on an analysis of long-term changes in mean annual near-surface air temperature of Ukraine. For Ukraine, monthly mean air temperature series were assembled from 45 meteorological stations (dataset $\Omega_{1900–2021}$) and used to derive average monthly values for 1900–2021 by spatial averaging across the network[11, 12]. Stations were selected to ensure (i) observations commencing around 1900,

---

[7] Волощук В. М., Бойченко С. Г. Сценарії можливих змін клімату України в XXI столітті (під впливом глобального антропогенного потепління). *Клімат України* / за ред. В. М. Ліпінського, В. А. Дячука, В. М. Бабіченко. Київ : Вид-во Раєвського, 2003. С. 308-331.

[8] Wilson L., New S., Daron J., Golding N. Climate Change Impacts for Ukraine. *Met Office*. 2021. URL: https://mepr.gov.ua/wp–content/uploads/2023/07/2_Vplyv–zminy–klimatu–v–Ukrayini.pdf (accessed on 15 January 2026).

[9] IPCC, 2023: Summary for Policymakers. Climate Change 2023: Synthesis Report. Contribution of Working Groups I, II and III to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change / Core Writing Team, H. Lee and J. Romero (eds.). Geneva : IPCC, 2023. P. 1–34. DOI: 10.59327/IPCC/AR6–9789291691647.001.

[10] Jacob D., Teichmann C., Sobolowski S., Katragkou E., Anders I., Belda M. et al. Regional climate downscaling over Europe: perspectives from the EURO–CORDEX community. *Regional Environmental Change*. 2020. V. 20, № 2. P. 51. DOI: 10.1007/s10113–020–01606–9.

[11] CGO. *Central Geophysical Observatory* of empirical data, 2021. URL: http://cgo–sreznevskyi.kyiv.ua/index.php?lang=en&fn=u_klimat&f=ukraine&p=1 (accessed on 29 November 2023).

[12] Climate Explorer. URL: http://climexp.knmi.nl/selectstation.cgi?id=someone@somewhere (accessed on 15 January 2026).

(ii) a proportion of missing data not exceeding 25 %, and (iii) a broadly even spatial distribution, while limiting elevation effects by restricting station altitudes to approximately ≤350–400 m.

Data gaps occur in several intervals and reflect well-known historical disruptions, with the largest discontinuities associated with the First World War and the subsequent period of political instability in the former Russian Empire (approximately 1914–1925), as well as the Second World War (1939–1945). In addition, station records for parts of eastern and southern Ukraine are incomplete for 2014–2023 due to the ongoing Russian aggression and resulting constraints on data availability.

The location of meteorological stations, which were used for analyses, is shown in Figure 1.

Fig. 1. Location of meteorological stations (used in this study) on the territory of Ukraine

Furthermore, using empirical observations from the Ukrainian network of meteorological stations for 1900–2021 and 1991-2021, we examined the spatiotemporal patterns of annual and seasonal surface air temperature. The seasonal temperature cycle was approximated by a first-order Fourier representation (a single annual harmonic), which enables an objective estimation of the amplitude and phase of the annual temperature wave[13]:

[13] Von Storch H., Zwiers F. W. Statistical analysis in climate research. Cambridge University Press, 1999. 495 p.

$$T_m^k \approx T_o^k + asin\frac{2\pi(m-0.5)}{12} + bcos\frac{2\pi(m-0.5)}{12},$$

$$a = \frac{1}{6}\sum T_m sin\frac{2\pi(m-0.5)}{12}, b = \frac{1}{6}\sum T_m cos\frac{2\pi(m-0.5)}{12}, \quad (1)$$

$$T_o^k = \frac{1}{12}\sum_m T_m^k, m = 1,2,\ldots,12, \quad A = \sqrt{a^2+b^2}, F = arctg\frac{b}{a},$$

here, k denotes the meteorological station, m is the month index, T_m^k is the mean monthly temperature, T_o^k is the mean annual temperature, A is the amplitude (°C), and F is the phase expressed in months.

The 1900–2021 period was used to characterize long-term trends in annual and monthly temperature and to provide a baseline for comparison with changes observed in the recent climate period. Climatic normal for 1991–2020 were calculated from station data, whereas the 1961-1990 normal were taken from the Climate Cadastre of Ukraine[14]. To quantify changes in the seasonal temperature course, linear trend coefficients were computed for each month at each station and subsequently averaged over the study area to obtain territory-wide estimates.

Three Shared Socioeconomic Pathways (SSP) projections of Ukraine's annual mean near-surface air temperature: SSP1-2.6, SSP2-4.5, and SSP3-7.0 were derived from the Berkeley Earth dataset. These scenarios represent projected temperature change relative to a late-19th-century (pre-industrial) baseline and correspond to alternative greenhouse-gas emissions trajectories through 2100[15].

The Berkeley Earth team has developed a statistical methodology to derive large-scale temperature anomalies from weather-station observations. A key advantage of this approach is that it can accommodate short, fragmented, and temporally discontinuous station records, allowing a substantially larger fraction of available measurements to be retained in the analysis. The method applies network-based weighting that accounts for station consistency and data quality within the surrounding spatial context, so that records with different uncertainty levels contribute appropriately without disproportionately influencing the reconstructed signal.

Trends were estimated using linear least-squares regression. The statistical significance of monotonic trends was evaluated with the non-parametric

[14] Кліматичний кадастр України. Стандартні норми за період 1961–1990 рр. Київ : Центральна геофізична обсерваторія, 2005. 48 с.

[15] Berkeley Earth. URL: http://berkeleyearth.org (accessed on 15 January 2026).

Mann-Kendall test at the 95 % confidence level. Data processing followed standard statistical procedures commonly applied to meteorological time series. Descriptive statistics, significance testing, and plotting were performed in MS Excel and XLSTAT.

Spatial mapping was carried out in QGIS and SAGA GIS. To generate continuous surfaces of the meteoparameters from the station network, we applied radial basis function interpolation using the thin-plate spline kernel, a method widely used for climatological interpolation, particularly when input points are relatively sparse[16, 17].

1. Long-time changes of average annual surface air temperature on the territory of Ukraine for the period from 1900 to 2021

Since 1880, the annual global surface air temperature has fluctuated, showing an overall signification upward tendency[18]. The annual surface air temperature anomaly was at its highest point in 2020, at 1.65 degrees above average. Anomalies in surface temperature in Ukraine followed a similar trend over the same period[19].

The long-term average annual surface air temperatures on the territory of Ukraine for the period from 1900 to 2021 are shown in Figure 2. According to the analysis of meteorological data, the average annual surface air temperature on the territory of Ukraine for the period 1900–2021 was 8.6 ± 0.9 °C. However, for the more recent period of 1991–2020, it increased to 9.5 ± 0.9 °C. Notably, the climatic norm of temperature for the period 1961–1990 was 8.4 ± 0.9 °C. The temperature in Ukraine exhibited an increase of 1.31 ± 0.42 °C per 100 years during the period 1900–2021. It's worth noting that climate change has accelerated significantly since the second half of the 20th century. Over the last 30 years (for the last climatic norm 1991–2020), a more pronounced increase in annual surface temperature, by 0.79 ± 0.08 °C per decade, was observed, contrasting with the trend of

[16] Boer E. P., de Beurs K. M., Hartkamp A. D. Kriging and thin plate splines for mapping climate variables. *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*. 2001. Vol. 3, № 2. P. 146–154. DOI: 10.1016/S0303–2434(01)85006–6.

[17] Smith T. B., Smith N., Weleber R. G. Comparison of nonparametric methods for static visual field interpolation. *Medical & biological engineering & computing*. 2017. Vol. 55. P. 117–126. DOI: 10.1007/s11517–016–1485–x.

[18] IPCC, 2023: Summary for Policymakers. Climate Change 2023: Synthesis Report. Contribution of Working Groups I, II and III to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change / Core Writing Team, H. Lee and J. Romero (eds.). Geneva: IPCC, 2023. P. 1–34. DOI: 10.59327/IPCC/AR6–9789291691647.001.

[19] Boychenko S., Maidanovych N. A century-long tendency of change in surface air temperature on the territory of Ukraine. *Geofizychnyi Zhurnal*. 2024. Vol. 46, № 2. P. 53–79. DOI: 10.24028/gj.v46i2.297227.

the climatic norm for the period 1961–1990, which showed a decrease of −0.02 ± 0.15 °C per decade.

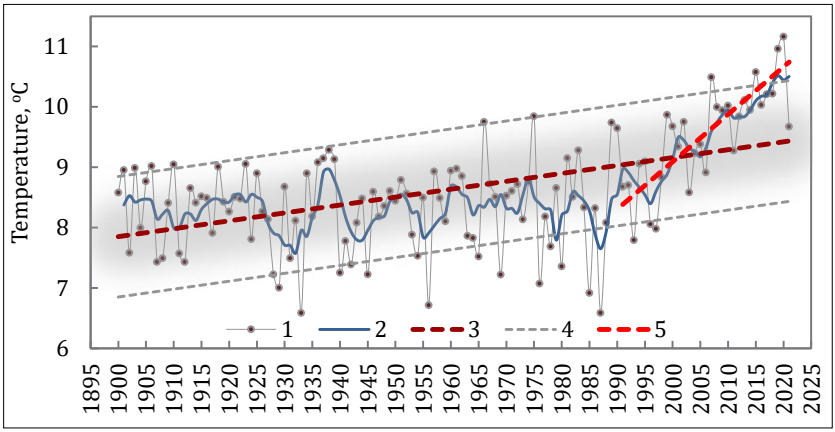


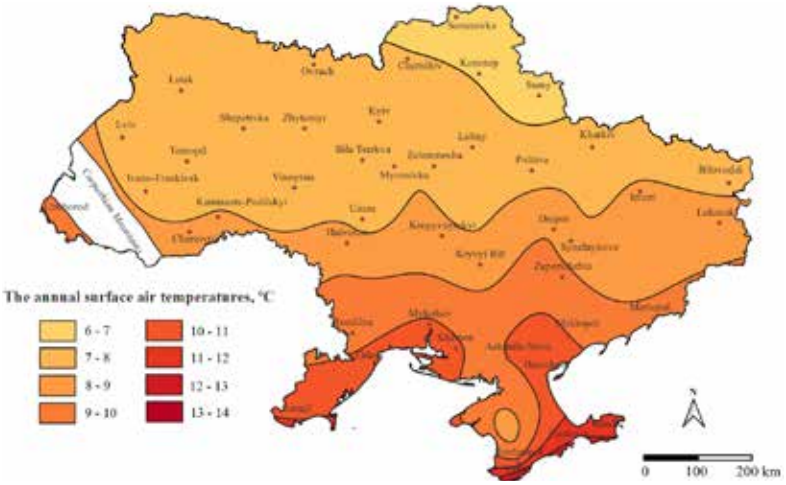
Fig. 2. Long-term average annual surface air temperatures

1 is averaged time series for 45 weather stations; 2 is five-year moving averages 4 is the standard deviation (±σ); 3 and 5 are linear trends for the periods 1900–2021 and 1991–2020) on the territory of Ukraine

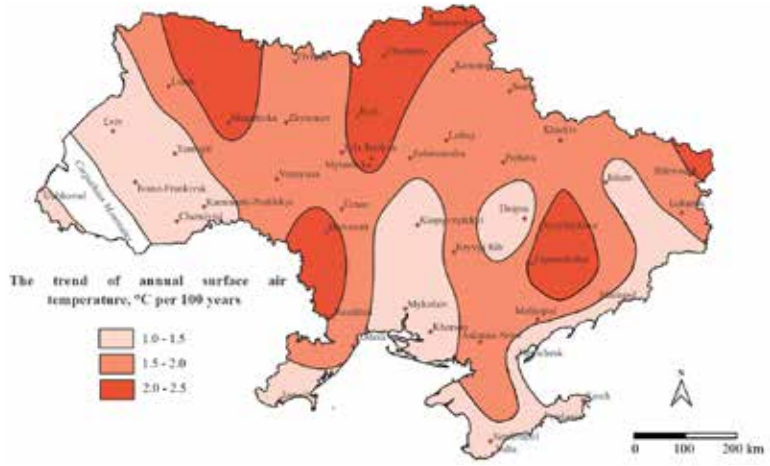
The spatial distribution of averaged annual surface air temperature and corresponding trends on the territory of Ukraine from 1900 to 2021 are shown in Figure 3. Changes in the temperature regime exhibit spatial-temporal peculiarities within Ukraine. A temperature increases within the range of 1.5–2.0 °C has been observed in most parts of the country from 1900 to 2021. Simultaneously, some parts of northern, northwestern, and eastern regions, as well as Vinnytsia and Zaporizhzhia oblasts, are characterized by more intense warming, reaching 2.0–2.5 °C, in contrast to southwestern, southern regions, and the territories adjacent to the Ukrainian Carpathians, where the temperature rise is within 1.0–1.5 °C. This is likely associated with both the latitude distribution peculiarities of global warming and the continental nature of climate conditions, along with regional features of atmospheric circulation[20, 21].

[20] Волощук В. М., Бойченко С. Г. Сценарії можливих змін клімату України в XXI столітті (під впливом глобального антропогенного потепління). *Клімат України* / за ред. В. М. Ліпінського, В. А. Дячука, В. М. Бабіченко. Київ: Вид-во Раєвського, 2003. С. 308–331.

[21] Бойченко С. Г. Напівемпіричні моделі та сценарії глобальних і регіональних змін клімату / за ред. В. М. Волощука. Київ : Наукова думка, 2008. 310 с. URL: https://www.researchgate.net/publication/321301027.



a



b

Fig. 3. The spatial distribution of averaged annual surface air temperature (a) and corresponding trends (b) on the territory of Ukraine from 1900 to 2021

The anomaly for a specific variable and year is calculated as the difference between the variable's value for that year and the multiannual average value of the variable or climatic norm. It should be noted that the approach to the estimated anomalies from multi-annual averages of global mean temperature

can be used for monthly averages[22, 23]. The average annual surface air temperature anomalies (ΔT) were calculated from the annual average value (weather data set $\Omega_{1900–2021}$) relative to the 1880–1900 pre-industrial average $\left(\Delta T = T_{year} - \left\langle T_{\langle 1880–1900 \rangle} \right\rangle\right)$[24]. Temperature anomalies from 1900 to 2021 indicate the coldest annual averages occurred in 1933, 1956, 1976, 1985, and 1987 ($\Delta T = -0.68 \pm 0.54$ °C), while the hottest annual averages were observed in 2007, 2015, 2019, and 2020 (ΔT = 0.74 ± 0.63 °C) (see Figure 4). In the recent decade, there has been a significant increase in temperature in Ukraine, as well as globally.

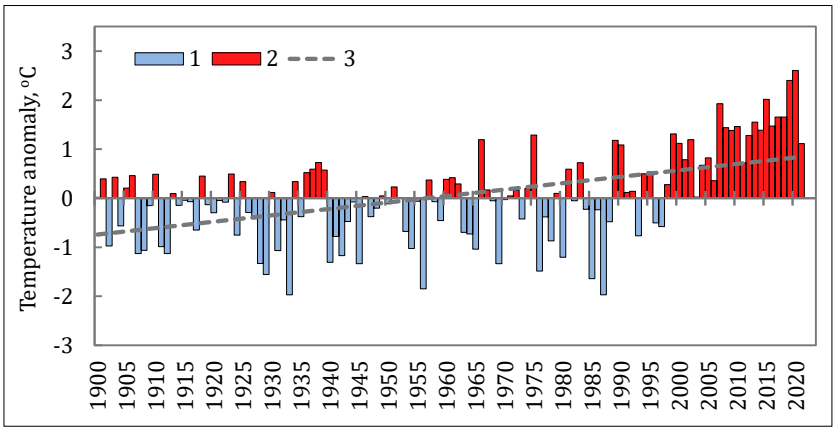


Fig. 4. The average annual surface air temperature anomalies
1 is the coldest annual average, 2 is the hottest annual average, and 3 is the linear trend on the territory of Ukraine for the period from 1900 to 2021

An analysis of interannual temperature variability *var{T}* (root-mean-square error) relative to long-term annual means *avr{T}* across Ukraine (1900–2021) reveals a clear spatial gradient. The highest *var{T}* values are concentrated in the cooler northwestern, northern, and northeastern regions.

[22] Climate Bulletin – about the data and analysis. URL: https://climate.copernicus.eu/climate–bulletin–about–data–and–analysis (accessed on 15 January 2026).

[23] State of the Global Climate. 2021. URL: https://library.wmo.int/viewer/56294?medianame =State_of_the_Global_Climate_2021_#page=1&viewer=picture&o=download&n=0&q= (accessed on 15 January 2026).

[24] Boychenko S., Maidanovych N. A century-long tendency of change in surface air temperature on the territory of Ukraine. *Geofizychnyi Zhurnal*. 2024. Vol. 46, № 2. P. 53–79. DOI: 10.24028/gj.v46i2.297227.

Conversely, the lowest variability is observed in the warmer southern, southwestern, and southeastern areas. This latitudinal intensification of warming rates towards the north aligns with broader climate trends observed across the Northern Hemisphere[25].

Known that the climatic conditions of Ukraine are shaped by the interplay of various external and internal factors[26]. Global influences encompass the planet's spatial orientation and the influx of solar electromagnetic radiation. Zonal factors involve the latitudinal characteristics of heat exchange distribution in temperate latitudes, the westward movement of air masses from the Atlantic, and meridional flows of air masses. Regionally, the orographic features of the terrain, proximity to seas, and local atmospheric circulation play pivotal roles. Local factors, including regional winds, the impact of water bodies, vegetation, and other elements, contribute to the formation of microclimatic characteristics in specific areas.

2. The annual cycle of surface air temperature on the territory of Ukraine

The seasonal course of the surface air temperature in Ukraine has characteristic features of temperate latitudes. On average, the maximum temperature in Ukraine is observed in summer (from 18.9 to 20.9 °C), the minimum – in winter (from −1.6 to −4.1 °C). In transitional seasons the average temperatures are from 1.3 to 15.2°C (in spring) and from 15.1 to 3.1 °C (in autumn). The annual cycle of averaged time series of surface air temperature for the $\Omega_{1900–2021}$ weather data set and their approximation on the territory of Ukraine in the period of 1900–2021 are shown in Figure 5. The comparison of the model monthly temperatures with their factual values presented that the reliability of the linear regression (R^2) is 0.97–0.99.

The seasonal pattern of temperature root-mean-square errors used here as an indicator of weather variability shows a clear cold-season maximum and warm-season minimum across Ukraine. The highest root-mean-square error occurs in January-February (3.2–3.5 °C), while the lowest values are observed during summer, reaching ~1.6–1.7 °C. The monthly course of root-mean-square errors 1900–2021 indicating that interannual temperature variability is substantially larger in winter than in summer. Against the backdrop of

[25] Волощук В. М., Бойченко С. Г. Сценарії можливих змін клімату України в XXI столітті (під впливом глобального антропогенного потепління). Клімат України / за ред. В. М. Ліпінського, В. А. Дячука, В. М. Бабіченко. Київ : Вид-во Раєвського, 2003. С. 308–331.

[26] Клімат України / за ред. В. М. Ліпінського, В. А. Дячука, В. М. Бабіченко. Київ : Вид-во Раєвського, 2003. 344 с.

ongoing climate change, many studies have reported seasonally differentiated temperature changes and shifts in seasonal temperature behavior[27, 28].

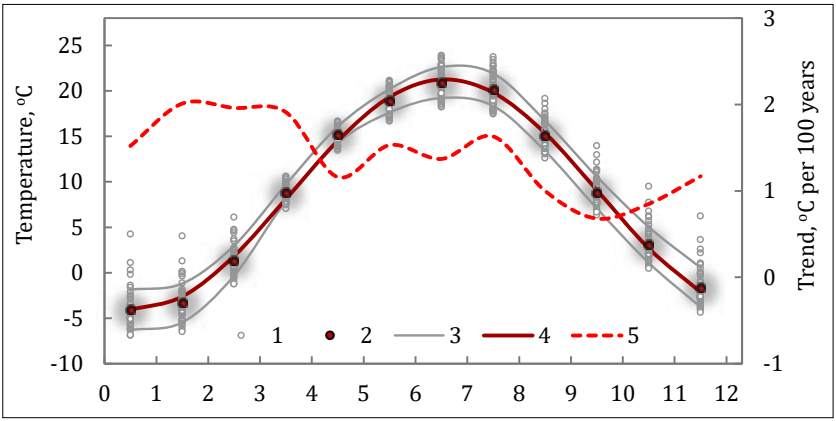


Fig. 5. The annual cycle of surface air temperature
1 is monthly data, 2 is average values for $\Omega_{1900–2021}$ dataset, 3 is ±σ,
4 is Fourier approximation and corresponding trends (5) on the territory of Ukraine for the period 1900–2021

For Ukraine over 1900–2021, the strongest warming is detected in the colder half of the year (October–March), with typical rates of ~0.7–2.0 °C per century, while the warm period (April–September) also warms, at ~1.0–1.9 °C per century. This seasonally structured signal is important because it implies not only a shift in mean temperature but also potential changes in thermal risks, phenological timing, and energy-demand seasonality.

The spatial distribution of average monthly surface temperature (in January, April, July, and October) on the territory of Ukraine has zonal differences, which are shown in Figure 6.

[27] Boychenko S., Voloshchuk V., Kuchma T., Serdyuchenko N. Long-time changes of the thermal continentality index, the amplitudes, and the phase of the seasonal temperature variation in Ukraine. *Geofizicheskiy Zhurnal*. 2018. Vol. 40, № 3. P. 81–96. DOI: 10.24028/gzh.0203–3100.v40i3.2018.137175

[28] Twardosz R., Kossowska-Cezak U. Large-area thermal anomalies in Europe (1951-2018). Temporal and Spatial Patterns. *Atmospheric Research*. 2021. Vol. 251. 105434. DOI: 10.1016/j.atmosres.2020.105434.

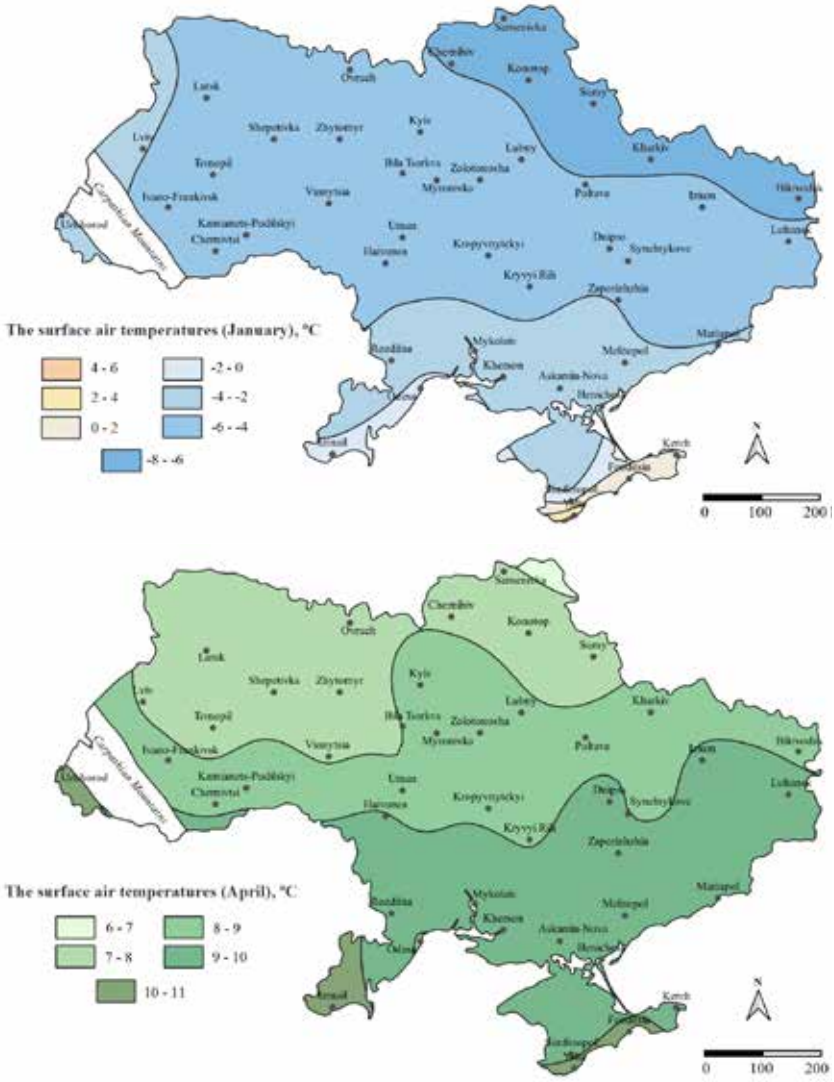
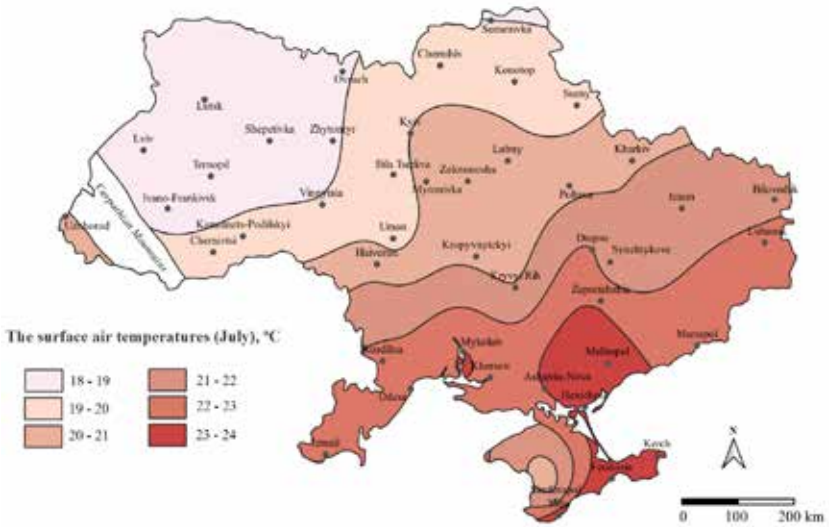


Fig. 6. The spatial averaged monthly surface air temperature on the territory of Ukraine (January, April, July, and October) for the period 1900–2021



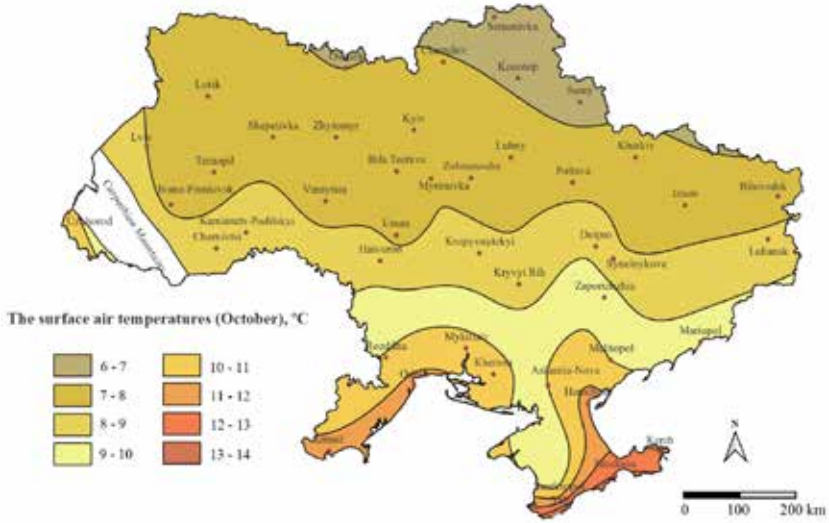


Fig. 6, page 422

The amplitude of surface air temperature is a useful integral indicator of climatic seasonality. For the station network beginning in 1900, the seasonal temperature amplitude (A) was calculated using Eq. (1). For Ukraine as a whole, the mean amplitude equals $A = 12.7 \pm 1.1$ °C for 1900–2021 and $A = 12.5 \pm 0.8$ °C for 1991–2020. Analysis of A over the 20th century and early 21st century indicates an overall decreasing tendency of about −0.5 to −0.1 °C per 100 years, driven primarily by stronger warming during the cold season. By contrast, for 1991–2020 the tendency is much weaker (−0.001 to −0.01 °C per decade) and is explained by the more substantial warming in the warm season, which partly offsets the earlier "cold-season-dominated" reduction in amplitude.

Previous studies have shown that, across Ukraine during the twentieth century, the rise in mean annual air temperature was accompanied by a reduction in the amplitude of the annual (seasonal) temperature cycle by about −0.4 °C per 100 years[29]. This pattern reflects stronger warming in the cold season and comparatively weaker warming in the warm season, resulting in a partial weakening of temperature "continentality".

Analysis of linear trends of the surface air temperature for several 30-year periods (meteorological norms) on the territory of Ukraine indicates certain differences (see Figure 7).

Substantial inter period variability is evident: both the sign and magnitude of trends for the same calendar month change markedly depending on the selected 30-year window. This indicates that the seasonal "warming profile" is not stable and is strongly contingent on the chosen baseline period, namely:

- 1951–1980 shows negative trends in a number of months, notably January (−0.6°C per decade) and December (down to −1.0 °C per decade), as well as negative values in the summer-autumn part of the year (June-October). This suggests that, during this 30-year interval, the "warming signal" had not yet become dominant across all seasons.
- 1961–1991 indicates warming in winter, especially toward the end and beginning of the year (January-March show positive trends), but distinct negative trends appear in late autumn, particularly November (pronounced cooling).
- 1971–2000 is characterized by mostly moderate positive trends during the cold half of the year and in part of the warm season; however, negative values persist for some months, especially November and December.

[29] Волощук В. М., Бойченко С. Г. Сценарії можливих змін клімату України в XXI столітті (під впливом глобального антропогенного потепління). *Клімат України* / за ред. В. М. Ліпінського, В. А. Дячука, В. М. Бабіченко. Київ : Вид-во Раєвського, 2003. С. 308–331.

• 1981–2010 shows positive trends in nearly all months, with maximum occurring in summer and late autumn (particularly July-August and November, where trends reach about 0.8–1.2 °C per decade).

• 1991–2020 exhibits the largest trend values: trends are positive almost throughout the year, with a clear intensification during the warm season and toward the end of the year. The strongest increases occur in September (0.9 °C per decade) and especially December (1.2 1.3 °C per decade). January is close to zero or slightly negative, highlighting pronounced within-season heterogeneity of the changes.

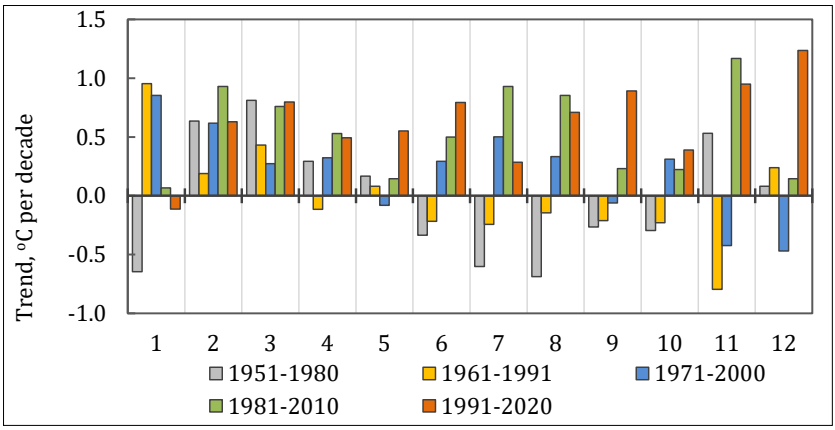


Fig. 7. Annual differences in linear trends of the surface air temperature for several 30-year periods on the territory of Ukraine

3. Scenarios of warming in Ukraine

Climate change scenarios are used to explore how different pathways of greenhouse-gas emissions and socio-economic development translate into future climate outcomes, thereby supporting mitigation and adaptation planning[30]. A robust feature across projections is that land areas tend to warm faster than oceans, largely due to lower effective heat capacity and differences in surface feedback; consequently, national land-based averages may exhibit a stronger warming signal than the global mean under the same

[30] IPCC, 2023: Summary for Policymakers. Climate Change 2023: Synthesis Report. Contribution of Working Groups I, II and III to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change / Core Writing Team, H. Lee and J. Romero (eds.). Geneva : IPCC, 2023. P. 1–34. DOI: 10.59327/IPCC/AR6–9789291691647.001.

scenario. At the same time, projections remain uncertain because climate models represent a complex, coupled system and differ in their sensitivity and regional responses to a given forcing trajectory[31].

In the IPCC Fifth Assessment Report (AR5), future forcing pathways were commonly represented by Representative Concentration Pathways (RCPs) – RCP2.6, RCP4.5, RCP6.0, and RCP8.5 – spanning low to very high radiative forcing by 2100[32]. In the CMIP6 framework, these pathways were updated and paired with Shared Socioeconomic Pathways (SSPs), which combine emissions trajectories with internally consistent assumptions about population, technology, energy systems, and policy choices[33]. The commonly used SSP-forcing combinations – SSP1-2.6, SSP2-4.5, SSP3-7.0, and SSP5-8.5 are designed to reach radiative forcing levels broadly comparable to the earlier RCP set by the end of the century, while offering a clearer socio-economic narrative context for each pathway[34].

Conceptually, SSP1 ("Sustainability") describes a world that increasingly prioritizes resource efficiency, low-carbon development, and inclusive growth-conditions that reduce challenges for both mitigation and adaptation. SSP2 ("Middle of the Road") reflects a continuation of historical development patterns with moderate improvements in efficiency but persistent structural constraints, producing intermediate challenges. SSP3 ("Regional Rivalry") emphasizes fragmented governance, weaker international cooperation, and higher barriers to mitigation and adaptation, which tends to sustain higher emissions and vulnerability. This framing is useful for Ukraine because it links the magnitude of projected warming not only to physical forcing, but also to the socio-economic context that shapes emissions and resilience.

For national-scale projections, a common approach is to derive a country-mean temperature series from climate-model output and then align (bias-adjust) the modelled baseline with observed historical data to ensure

[31] Climate Change 2021 – The Physical Science Basis. Working Group I Contribution to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Cambridge University Press, 2023. P. 553–672. DOI: 10.1017/9781009157896.006.

[32] Lee J., Marotzke J. et al. Future Global Climate: Scenario-Based Projections and Near-Term Information. Climate Change 2021: The Physical Science Basis / V. Masson-Delmotte et al. (eds.). Cambridge : Cambridge University Press, 2021. P. 553–672. DOI: 10.1017/9781009157896.006.

[33] Meinshausen M., Nicholls Z., Lewis J. et al. The Shared Socio-Economic Pathway (SSP) Greenhouse Gas Concentrations and Their Extensions To 2500. *Geoscientific Model Development*. 2020. Vol. 13, № 8. P. 3571–3605. DOI: 10.5194/gmd–13–3571–2020.

[34] Riahi K., van Vuuren D., Kriegler E. et al. The Shared Socioeconomic Pathways and their Energy, Land Use, and Greenhouse Gas Emissions Implications: An Overview. *Global Environmental Change*. 2017. Vol. 42. P. 153–168. DOI: 10.1016/j.gloenvcha.2016.05.009.

consistency between the reference period and the projection[35]. In this study, the historical reference series used for scenario construction is taken from Berkeley Earth, which is widely applied in climate monitoring and synthesis products[36].

The projected changes in annual mean surface air temperature for Ukraine relative to a late-19th-century pre-industrial baseline under three SSP pathways are presented Figure 8. In brief:

- SSP1-2.6 represents a low-forcing pathway consistent with rapid mitigation, where warming stabilizes at comparatively lower levels by 2100;
- SSP2-4.5 depicts an intermediate pathway with slower emissions reductions and mid-range warming outcomes by the end of the century;
- SSP3-7.0 reflects a high-forcing pathway with continued growth of emissions for the century and correspondingly larger warming by 2100.

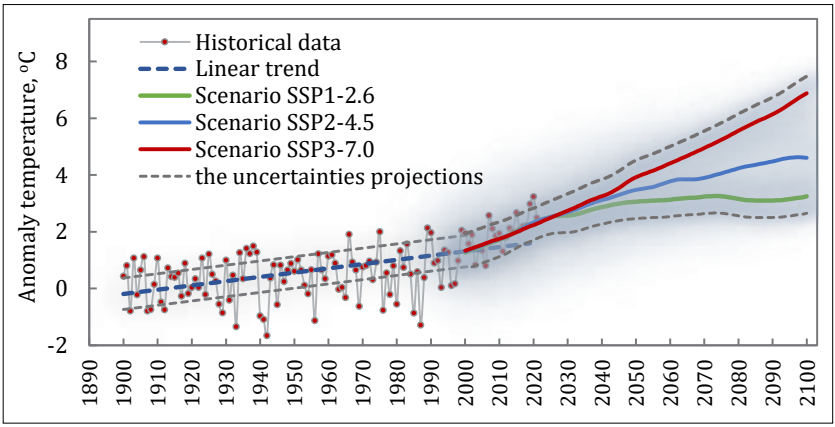


Fig. 8. The annual average surface temperature changes relative to a pre-industrial baseline in the late 19th century in Ukraine (historical data) and the three scenarios of changes (SSP1-2.6, SSP2-4.5, and SSP3-7.0), based on greenhouse emissions scenarios by 2100 (the uncertainties associated with projections)

Source: http://berkeleyearth.org

[35] Krakovska S., Palamarchuk L., Gnatiuk N., Shpytal T. Projections of Air Temperature and Relative Humidity in Ukraine Regions to the Middle of the 21st Century Based on Regional Climate Model Ensembles. *Geoinformatika*. 2018. № 3. P. 62–77. URL: https://www.geology.com.ua/en/7514-2/

[36] Berkeley Earth. URL: http://berkeleyearth.org (accessed on 15 January 2026).

Finally, SSP2-4.5 may be prudently treated as a pragmatic "central" reference, as it approximates a world where mitigation progresses but remains insufficient to limit warming to the lowest range. Accordingly, SSP1-2.6 and SSP3-7.0 define the lower- and higher-end envelopes for a comprehensive risk-based analysis[37].

CONCLUSIONS

This study consolidates long-term meteorological observations to quantify century-scale change in Ukraine's thermal regime and to support climate assessment and decision-making. For 1900–2021, the national mean annual surface air temperature equals 8.6 ± 0.9 °C, rising to 9.5 ± 0.9 °C for 1991–2020. The linear trend reaches 1.31 ± 0.42 °C per century, whereas the most recent 30 years show a much steeper increase of 0.79 ± 0.08 °C per decade, evidencing an acceleration of warming relative to early twentieth-century conditions.

Spatial diagnostics indicate that warming is pervasive but not uniform. Across most of the country, average annual temperature increased by ~1.5–2.0 °C between 1900 and 2021. The strongest changes (2.0–2.5 °C) are detected in parts of northern, northwestern, and eastern Ukraine and in Vinnytsia and Zaporizhzhia oblasts, while comparatively smaller increases (1.0–1.5 °C) occur in the southwest, the south, and areas near the Ukrainian Carpathians. Annual anomalies also confirm the shift toward warmer conditions, with recent decades concentrating on many of the warmest years in the record.

Interannual variability exhibits a clear spatial structure, with larger year-to-year dispersion in cooler northern regions and smaller variability in warmer southern/southwestern areas. The seasonal cycle remains pronounced (summer maxima, winter minima) and is well captured by a compact harmonic representation, supporting the use of compact descriptors (amplitude and phase) in regional diagnostics. Agreement between modeled and observed values is high. Trend significance is assessed with the Mann-Kendall test (95 % level), and national-scale maps are produced using thin-plate spline radial basis interpolation.

Finally, SSP1-2.6, SSP2-4.5, and SSP3-7.0 projections provide a scenario context for interpreting observed change and for communicating plausible futures. Collectively, the results highlight the need for region-specific adaptation

[37] IPCC, 2023: Summary for Policymakers. Climate Change 2023: Synthesis Report. Contribution of Working Groups I, II and III to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change / Core Writing Team, H. Lee and J. Romero (eds.). Geneva : IPCC, 2023. P. 1–34. DOI: 10.59327/IPCC/AR6–9789291691647.001.

and for continued enhancement of station networks and data products to better resolve emerging gradients and extremes relevant to impact nationwide.

SUMMARY

Long-Term Temperature Change in Ukraine (1900–2021): Trends, Variability and Scenarios synthesize a century of instrumental observations to quantify long-term change, interannual variability, and future trajectories of near-surface air temperature across Ukraine. Using monthly mean temperature series from 45 meteorological stations ($\Omega_{1900–2021}$) spatially averaged nationally, the study diagnoses annual, monthly, and seasonal behaviour while acknowledging historical discontinuities and recent data constraints in parts of eastern and southern Ukraine. Trend robustness is assessed with least-squares regression and the Mann-Kendall test, and spatial fields are mapped with thin-plate spline radial-basis interpolation in QGIS/SAGA GIS. Results show an accelerated warming signal: national mean annual temperature for 1900–2021 is 8.6 ± 0.9 °C, increasing to 9.5 ± 0.9 °C for 1991–2020, with a centennial trend of 1.31 ± 0.42 °C per 100 years and a recent rate of 0.79 ± 0.08 °C per decade. Warming is spatially heterogeneous, reaching ~2.0–2.5 °C in parts of northern, northwestern and eastern Ukraine, versus ~1.0–1.5 °C in the southwest, south, and areas adjacent to the Carpathians. Variability is seasonally structured, with maxima in January-February and minima in summer, implying differentiated risks for energy demand, phenology, and thermal extremes. The synthesis offers a baseline for monitoring extremes and prioritising sectoral adaptation measures. Finally, Berkeley Earth-based SSP1-2.6, SSP2-4.5 and SSP3-7.0 projections provide a scenario envelope for 21st-century warming to support risk-informed adaptation and climate-impact planning.

Bibliography

1. Berkeley Earth. URL: http://berkeleyearth.org (accessed on 15 January 2026).

2. Boer E. P., de Beurs K. M., Hartkamp A. D. Kriging and thin plate splines for mapping climate variables. *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*. 2001. Vol. 3, № 2. P. 146–154. DOI: 10.1016/S0303–2434 (01)85006–6.

3. Boychenko S., Maidanovych N. A century-long tendency of change in surface air temperature on the territory of Ukraine. *Geofizychnyi Zhurnal*. 2024. Vol. 46, № 2. P. 53–79. DOI: 10.24028/gj.v46i2.297227.

4. Boychenko S., Voloshchuk V., Kuchma T., Serdyuchenko N. Long-time changes of the thermal continentality index, the amplitudes, and the

phase of the seasonal temperature variation in Ukraine. *Geofizicheskiy Zhurnal*. 2018. Vol. 40, № 3. P. 81–96. DOI: 10.24028/gzh.0203–3100.v40i3.2018.137175.

5. CGO. Central Geophysical Observatory of empirical data, 2021. URL: http://cgo–sreznevskyi.kyiv.ua/index.php?lang=en&fn=u_klimat&f=ukraine&p=1 (accessed on 29 November 2023).

6. Climate Bulletin – about the data and analysis. URL: https://climate.copernicus.eu/climate–bulletin–about–data–and–analysis (accessed on 29 November 2023).

7. Climate Change 2021 – The Physical Science Basis. Working Group I Contribution to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Cambridge University Press, 2023. P. 553–672. DOI: 10.1017/9781009157896.006.

8. Climate Explorer. URL: http://climexp.knmi.nl/selectstation.cgi?id=someone@somewhere (accessed on 15 January 2026).

9. Hegerl G. C., Brönnimann S., Schurer A., Cowan T. The early 20th–century warming: Anomalies, causes, and consequences. *Wiley Interdisciplinary Reviews: Climate Change*. 2018. Vol. 9, № 4. e522. DOI: 10.1002/wcc.522.

10. IPCC, 2023: Summary for Policymakers. Climate Change 2023: Synthesis Report. Contribution of Working Groups I, II and III to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change / Core Writing Team, H. Lee and J. Romero (eds.). Geneva: IPCC, 2023. P. 1–34. DOI: 10.59327/IPCC/AR6–9789291691647.001.

11. Jacob D., Teichmann C., Sobolowski S., Katragkou E., Anders I., Belda M. et al. Regional climate downscaling over Europe: perspectives from the EURO–CORDEX community. *Regional Environmental Change*. 2020. Vol. 20, № 2. 51. DOI: 10.1007/s10113–020–01606–9.

12. Krakovska S., Palamarchuk L., Gnatiuk N., Shpytal T. Projections of Air Temperature and Relative Humidity in Ukraine Regions to the Middle of the 21st Century Based on Regional Climate Model Ensembles. *Geoinformatika*. 2018. № 3. P. 62–77. URL: https://www.geology.com.ua/en/7514-2/

13. Lee J., Marotzke J. et al. Future Global Climate: Scenario-Based Projections and Near-Term Information. Climate Change 2021: The Physical Science Basis / V. Masson-Delmotte et al. (eds.). Cambridge : Cambridge University Press, 2021. P. 553–672. DOI: 10.1017/9781009157896.006.

14. Meinshausen M., Nicholls Z., Lewis J. et al. The Shared Socio-Economic Pathway (SSP) Greenhouse Gas Concentrations and Their Extensions To 2500. *Geoscientific Model Development*. 2020. Vol. 13, № 8. P. 3571–3605. DOI: 10.5194/gmd–13–3571–2020.

15. Nita I. A., Sfîcă L., Voiculescu M., Birsan M. V., Micheu M. M. Changes in the global mean air temperature over land since 1980. *Atmospheric Research*. 2022. Vol. 279. 106392. DOI: 10.1016/j.atmosres.2022.106392.

16. Riahi K., van Vuuren D., Kriegler E. et al. The Shared Socioeconomic Pathways and their Energy, Land Use, and Greenhouse Gas Emissions Implications: An Overview. *Global Environmental Change*. 2017. Vol. 42. P. 153–168. DOI: 10.1016/j.gloenvcha.2016.05.009.

17. Smith T. B., Smith N., Weleber R. G. Comparison of nonparametric methods for static visual field interpolation. *Medical & biological engineering & computing*. 2017. Vol. 55. P. 117–126. DOI: 10.1007/s11517–016–1485–x.

18. State of the Global Climate. 2021. URL: https://library.wmo.int/viewer/56294?medianame=State_of_the_Global_Climate_2021_#page=1&viewer=picture&o=download&n=0&q= (accessed on 29 November 2023).

19. Twardosz R., Kossowska-Cezak U. Large-area thermal anomalies in Europe (1951-2018). Temporal and Spatial Patterns. *Atmospheric Research*. 2021. Vol. 251. 105434. DOI: 10.1016/j.atmosres.2020.105434.

20. Von Storch H., Zwiers F. W. Statistical analysis in climate research. Cambridge University Press, 1999. 495 p.

21. Wilson L., New S., Daron J., Golding N. Climate Change Impacts for Ukraine. Met Office. 2021. URL: https://mepr.gov.ua/wp–content/uploads/2023/07/2_Vplyv–zminy–klimatu–v–Ukrayini.pdf (accessed on 15 January 2026).

22. WMO. Provisional State of the Global Climate. 2022. URL: https://reliefweb.int/report/world/wmo–provisional–state–global–climate–2022 (accessed on 15 January 2026).

23. Бойченко С. Г. Напівемпіричні моделі та сценарії глобальних і регіональних змін клімату / за ред. В. М. Волощука. Київ : Наукова думка, 2008. 310 с. URL: https://www.researchgate.net/publication/321301027.

24. Волощук В. М., Бойченко С. Г. Сценарії можливих змін клімату України в XXI столітті (під впливом глобального антропогенного потепління). Клімат України / за ред. В. М. Ліпінського, В. А. Дячука, В. М. Бабіченко. Київ : Вид-во Раєвського, 2003. С. 308–331.

25. Клімат України / за ред. В. М. Ліпінського, В. А. Дячука, В. М. Бабіченко. Київ : Вид-во Раєвського, 2003. 344 с.

26. Кліматичний кадастр України. Стандартні норми за період 1961–1990 рр. Київ : Центральна геофізична обсерваторія, 2005. 48 с.

Information about the authors:
Boychenko Svitlana Hryhorivna,
Doctor of Geographical Sciences, Associate Professor,
National University of Kyiv-Mohyla Academy, Kyiv, Ukraine
2, Skovorody street, Kyiv, 04070, Ukraine;
Subbotin Institute of Geophysics
of the National Academy of Sciences of Ukraine
32, Akademika Palladina avenue, Kyiv, 03680, Ukraine

Maidanovych Nadiia Mykolaivna,
Candidate of Geographical Sciences,
Leonid Pogorilyy Ukrainian Scientific Research Institute
of Forecasting and Testing of Machinery
and Technologies for Agricultural Production
5, Inzhenerna street, Doslidnytske, Bila Tserkva district,
Kyiv region, 08654, Ukraine

CHAPTER 20

ГІДРОЕКОЛОГІЧНИЙ СТАН ТА ФУНКЦІОНУВАННЯ ЩИРЕЦЬКОГО ВОДОСХОВИЩА В УМОВАХ АНТРОПОГЕННОГО НАВАНТАЖЕННЯ

Іванов Є. А., Пилипович О. В., Біланюк В. І.
DOI https://doi.org/10.30525/978-9934-26-654-6-20

ВСТУП

Водойми в околицях великого міста є не лише простором для відпочинку, а й важливим природним елементом, що впливає на якість життя мешканців. Такі водні об'єкти формують екологічний каркас території, сприяють збереженню природного балансу, зниженню температурних екстремумів і підтриманню біорізноманіття. Наявність водних об'єктів позитивно впливає на фізичний й психологічний стан людей, створює привабливе середовище для рекреації та інтегрується у приміський простір як важливий естетичний елемент. Водночас водосховища виконують економічну й стратегічну роль, відкривають нові можливості для сталого розвитку, інвестицій та реалізації природоохоронних ініціатив в умовах кліматичних змін.

Щирецьке водосховище, яке створене у руслі р. Щирка і розташоване в межах села Наварія Пустомитівської міської територіальної громади та належить до блакитної інфраструктури Львівської агломерації. Водосховище планують реорганізувати у нову рекреаційну зону, а для цього необхідно ліквідувати чи обмежити джерела забруднення водойми й прилеглої території, розчистити її дно від забруднених донних наносів, забезпечити збереження біорізноманіття та стале функціонування водної екосистеми.

Використання водосховища для рекреації із купанням, рибальством та спортивним відпочинком має значні вимоги до її санітарно-гігієнічного стану. Сучасний стан водойми викликає занепокоєння, вона забруднена промисловими, комунальними і зливовими стоками, а її прибережні території сильно засмічені. Це створює небезпеку для здоров'я місцевих жителів і відпочиваючих. Негативний вплив посилює зростання у водозборі водосховища чисельності населення та відновлення промисловості. Головним наслідком впливу поселень на

водойму є порушення природного функціонування водних екосистем, втрата джерел живлення та трансформація структури річкової мережі у верхів'ях. Ці зміни призводять до незворотних екологічних наслідків, до деградації й зникнення водних екосистем.

1. Географічне розташування

Щирецьке водосховище розташоване на південний-захід від міста Львів, на відстані 3,95 км від об'їзної траси міста. Водойма розташована у водозборі річки Щирка, яка належить до басейну Дністра та є його лівою притокою[1]. Річки Щирка, Малечковича і Ковир, які живлять водосховище протікають територією Сокільницької і Солонківської громад, що з півночі й північного сходу межують з Пустомитівською міською територіальною громадою (рис. 1).

Водосховище створене у руслі р. Щирка у 1954 р. й до сьогодні перебуває у постійному користуванні ЛМКП «Львівтеплоенерго». Головним призначенням водойми є регулювання стоку р. Щирка та наповнення системи технічного водопостачання Львівської ТЕЦ-1. Водночас, водосховище використовують як зону відпочинку, а також для любительської рибалки і спортивного веслування. Водойму розташовано у рівнинній місцевості, оточена поселеннями: з північного заходу – с. Наварія, з північного сходу – села Малечковичі і Нагоряни, з півдня – с. Поршна. Поруч з водосховищем проходить автодорога Т 1416 Львів–Дрогобич.

2. Характеристика водосховища

Щирецьке водосховище (гідровузол) розташоване у 19 км від витоку річки. Об'єм води у водоймі становить 4,15 млн м^3 води, середня глибина – 3,6 м, а максимальна глибина – 7,8 м. Фільтрація водосховища через греблю складає 0,48 млн м^3/рік. Втрати на випаровування з його поверхні становлять 0,60 млн м^3/рік. Мінімальна величина пропуску у нижній б'єф складає 3,16 млн м^3/рік. При нормальному підпірному рівні площа водосховища становить 1,15 км^2. До комплексу гідротехнічних споруд водосховища належать земляна і водозливна греблі, насосна станція та водопровід до Львівської ТЕЦ-1 довжиною 11,5 км.

[1] Геоекологія Львівської області : монографія / Ю. Андрейчук, Л. Безручко, В. Біланюк та ін. / за заг. ред. Є. Іванова. Львів : Простір-М, 2021. 606 с.

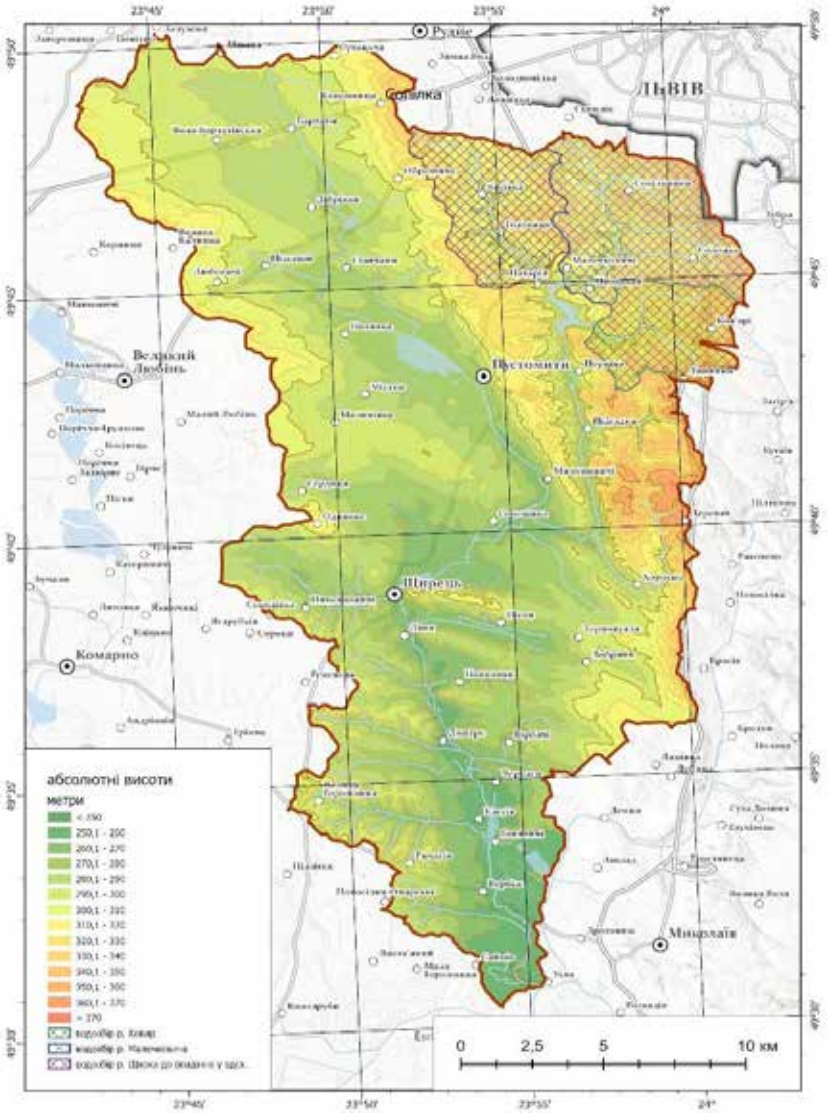


Рис. 1. Розташування Щирецького водосховища та його головних допливів у межах водозбору р. Щирка[2]

[2] Геоекологія Щирецького водосховища / Андрейчук Ю., Біланюк В., Бота О. та ін. / за заг. ред. Є. Іванова та О. Пилипович. Львів : ЛНУ ім. І. Франка, 2024. 116 с.

Земляну греблю відсипали із суглинків, укріпили камінням і щебенем, її довжина становить 185 м, ширина – 20 м, а максимальна висота – до 10 м. По гребеню греблі прокладено автодорогу. Водозливна бетонна гребля є відкритою з двома отворами шириною 6,0 м. Найнижча відмітка порогу водозливу складає 286,0 м. При цьому постійно підтримують рівень НПР, що становить 289,0 м. Максимальний горизонт води визначає гребень затворів, що знаходиться на рівні 289,3 м[3]. У лютому-березні водосховище підготовлюють до прийому вод весняної повені, для чого виконується спрацювання води відповідно до протиповеневих прогнозів.

Мінімально дозволена величина санітарного попуску води у нижній б'єф гідровузла становить 0,10 м[3]/с. Річний об'єм забору води із водосховища усіма водокористувачами сягає 2,38 млн м[3]/рік. Об'єм притоку води у водосховище в маловодний рік 95 %-ої забезпеченості складає 6,62 млн м[3].

3. Гідрологічні умови водозбору р. Щирка

Щирецьке водосховище розташоване у руслі р. Щирка, тому розглянемо характеристики цього водотоку. Витік водотоку знаходиться у Лапаївському лісництві на висоті 312 м н. р. м., 1,14 км на північний схід від с. Оброшино Львівського району. Річка впадає у р. Дністер з лівого берега на висоті 251 м біля с. Устя Стрийського району. Довжина водотоку становить 46 км, площа водозбору – 434 км[2], загальне падіння – 77 м, середній похил русла – 1,67 ‰. Річка належить до малих, тому ширина її прибережно-захисної смуги становить 25 м. Живлення річки є змішаним, при цьому на дощове живлення припадає 50 % від загальної кількості, а 37 і 13 % – на снігове і підземне живлення відповідно.

Річкова мережа Щирки є розвинутою, у її водозборі протікає 74 річки загальною протяжністю 213 км. У структурі мережі домінують водотоки першого рангу, частка яких становить 75,4 % від загальної кількості річок. На річки другого рангу припадає 19,2 %, третього рангу – 4,3 %, четвертого рангу – 0,8 %, п'ятого рангу – 0,3 % від загальної кількості річок. Усі річки, за виключенням р. Щирка та її притоки р. Ставчанки мають довжину до 10 км. Густота річкової мережі складає 0,49 км/км[2, 4]. Правобережжя басейну відрізняє густіша мережа.

---

[3] Геоекологія Щирецького водосховища / Андрейчук Ю., Біланюк В., Бота О. та ін. / за заг. ред. Є. Іванова та О. Пилипович. Львів : ЛНУ ім. І. Франка, 2024. 116 с.

[4] Ковальчук І. П. Регіональний еколого-геоморфологічний аналіз. Львів : Ін-т україно-знавства, 1997.

Долина річки є здебільшого прямою й трапеціїподібною, у витоці – із нечітко вираженою формою, а в околицях с. Наварія ще й заболоченою. Середня ширина долини становить 1,0–1,5 км, нижче від Наварії долина звужується до 0,3 км, а біля с. Семенівка сягає 3,0 км. Русло слабо звивисте, нерозгалужене. У руслі виявлено низку островів складених піщаними і торф'яними ґрунтами, що поросли травою. У верхів'ї впродовж 800 м русло сухе, не чітко виражене, біля сіл Годовиця, Поршна і Кагуїв перегороджено греблями, що утворюють каскад ставків. Швидкість течії змінюється від 0,1 до 0,6 м/с. Поблизу берегів русло заростає осокою й очеретом, місцями суцільно зарослі лілією і лататтям, дно рівне, піщано-мулисте, поблизу с. Годовиця – піщане. Береги висотою 0,3–3,0 м (місцями зливаються із схилами долини), круті і дуже круті, у нижній течії подекуди пологі, переважно лугові, зрідка поросли чагарником і деревами, складені піщаними і торф'яними ґрунтами.

Схили долини є слабоеродованими висотою 10–20 м, а лівий схил місцями до 30–60 м, у верхній течії – випуклими, крутими, у нижній – ввігнутими або прямими, помірно крутими і пологими. Схилові поверхні переважно розорані, зрідка залісненні (лівий між селами Басівка і Годовиця вкритий чагарником), складені супісками і суглинками, місцями оголюються піщаники і гіпси. Поблизу сіл Лани і Кагуїв долина має тераси шириною 300–500 м, із крутим уступом висотою 2,5–8,0 м, з нерівною поверхнею, зарослою травою та чагарниками, частково розораною. У підніжжя схилів, особливо у верхів'ї, зустрічаються виходи ґрунтових вод з дебітом до 3–5 дм^3/с[5].

Заплава є двосторонньою із шириною до 0,1–1,0 км, біля с. Підсадки і в с. Лани впродовж 0,5 км вона відсутня. Здебільшого заплава суха, вкрита лучною рослинністю, подекуди заболочена, поросла осокою і тростиною, у верхів'ї представляє собою болото із шаром води 0,1–0,2 м. Пересічена улоговинами, сильно зарослими старицями глибиною до 1,2 м, торф'яними кар'єрами і сухими каналами, складена супіщаними ґрунтами, на заболочених ділянках – торф'яними. Біля с. Кагуїв створені ставки для розведення риби, що зараз сильно заросли болотною рослинністю, деякі пересохли. При високих підйомах рівнів заплава затоплюється шаром до 1,0–1,5 м. У маловодні роки вода на заплаву не виходить, під час паводків під воду йдуть понижені ділянки заплави на глибину 0,3–0,5 м[6].

---

[5] Геоекологія Щирецького водосховища / Андрейчук Ю., Біланюк В., Бота О. та ін. / за заг. ред. Є. Іванова та О. Пилипович. Львів : ЛНУ ім. І. Франка, 2024. 116 с.

[6] Пилипович О., Ковальчук І. Геоекологія річково-басейнової системи верхнього Дністра : монографія / за наук. ред. І. П. Ковальчука. Львів – Київ : ЛНУ ім. Івана Франка, 2017.

Рис. 2. Схема розташування гідростворів на топографічній карті масштабу 1 : 50 000

Вода у р. Щирка відносно прозора із зеленуватим відтінком, без запаху і присмаку, без доочистки не придатна для пиття, на заболочених ділянках має коричнюватий колір і слабо болотний присмак.

На річці функціонує пункт гідрометеорологічних спостережень у смт Щирець, з перервами він працює від 1899 р. й до сьогодні. Площа водозбору до гідропоста становить 307 км^2, відстань до гирла – 19 км, а відмітка «нуля» гідропоста становить 258,85 м.

Об'єктом гідроекологічного дослідження є Щирецьке водосховище, річка Щирка та дві її притоки – річки Малечковича і Ковир, що живлять водойму. Для розрахунків водного балансу водойми закладено чотири створи спостережень (рис. 2):

створ 1 – перед впадінням р. Щирки у водосховище;

створ 2 – перед впадінням р. Малечковича у водосховище;

створ 3 – перед впадінням р. Ковир у водосховище;

створ 4 – у руслі р. Щирка після витоку з водосховища.

Створ 4 є замикаючим і розташований у нижньому б'єфі напірної греблі, у місці витоку р. Щирка із водосховища. Розрахункові гідрологічні створи обрано для визначення балансу водних ресурсів водосховища. Розрахунки водного балансу здійснив гідролог В. Чорний. Річка Щирка та її притоки мають такі фізико-географічні і морфометричні параметри, що обраховані на основі топографічних карт (табл. 1, 2).

Таблиця 1

Морфометричні характеристики р. Щирка та її допливів

Назва водотоку	Створ	Площа басейну, км^2	Довжина, км	Похили, ‰		Лісистість басейну, %
				І сер.	І сер. зв.	
р. Щирка	1	24,9	8,55	4,56	3,04	23,8
р. Малечковича	2	29,0	8,25	2,67	1,78	0,63
р. Ковир	3	13,4	5,06	7,31	3,66	14,6
р. Щирка	4	74,5	12,0	3,25	2,24	11,1

Таблиця 2

Розрахункові морфометричні характеристики Щирецького водосховища

№ з/п	Найменування показників	Одиниця виміру	Кількість
1	2	3	4
1	Назва водного об'єкта – Щирецьке водосховище		
2	Площа водного дзеркала при НПР	км^2	0,80
3	Площа водного дзеркала при РМО	км^2	0,47
4	Довжина	км	2,4

Продовження таблиці 2

1	2	3	4
5	Максимальна ширина	км	0,5
6	Середня ширина	м	333
7	Максимальна глибина біля греблі	м	6,91
8	Середня глибина	м	3,10
9	Відмітка нормального підпірного рівня (НПР)	м БС	289,00
10	Відмітка форсованого підпірного рівня (ФПР)	м БС	289,30
11	Відмітка рівня мертвого об'єму (РМО)	м БС	284,70
12	Повний об'єм	млн $м^3$	2,97
13	Корисний об'єм	млн $м^3$	2,48
14	Мертвий об'єм	млн $м^3$	0,49

У гідрологічному відношенні р. Щирка є достатньо вивченою. В середній течії ріки, у смт Щирець функціонує стаціонарний гідропост, який слугує гідропостом-аналогом. Головні морфометричні параметри водозбору Щирки до гідропоста розміщено у таблиці 3. У відкритому доступі є дані спостережень із 1946 по 2016 рр. Наявний 70-річний період спостережень є достатнім для узагальнення розрахункових характеристик поверхневого стоку річки.

Таблиця 3

Морфометричні параметри гідропоста на р. Щирка (смт Щирець)

Гідропост	**Площа водозбору, $км^2$**	**Довжина ріки, км**	**Похили ріки, ‰**		**Середня висота водо-збору, м**	**Середній похил водо-збору, ‰**	**Залісе-ність водо-збору, %**
			середній	**середній зважений**			
р. Щирка – смт Щирець	307	27	2,2	1,7	300	27	12,2

Витрати води у розрахункових створах 1–4 визначені із використанням гідрологічних рядів даних з гідропоста-аналога на р. Щирка (смт Щирець) шляхом опрацювання їх методом математичної статистики. Окрім цих даних використано матеріали польових гідрологічних досліджень, що проведено у грудні 2023 р. На річках району сформувалась зимова межень. Рівні води близькі до мінімальних відміток. Морфометричні параметри русел водотоків подано у таблиці 4.

Таблиця 4

Результати польових досліджень морфометричних характеристик русла р. Щирка та витрат води

Назва річки	Створ	Ширина русла, м	Середня глибина русла, м	Середня швидкість течії, м/с	Витрата води, м³/с
Щирка	1	5,0	0,34	0,066	0,107
Малечковича	2	2,1	0,44	0,193	0,172
Ковир	3	1,7	0,06	0,044	0,004
Щирка	4	6,8	0,40	0,059	0,134

Сумарний притік води в Щирецьке водосховище складає 283 дм³/с, що на 149 дм³/с перевищує витік з нього. Невідповідність балансу пояснюємо технічним забором води із водосховища, втратами на випаровування, інфільтрацію та акумуляцією стоку. Завищені витрати води у створах 1 і 2 можуть бути викликані скидом побутових стоків у р. Щирка і Малечковича. Отримані результати вимірювань витрат води у р. Ковир дещо спотворені і занижені.

Режим р. Щирка визначають кліматичні особливості території водозбору, насамперед характер і кількість опадів та температура повітря. Відповідно до кліматичних параметрів регіон має змішане живлення. В усі сезони стік води нижчий 50 % від річного стоку, в об'ємному відношенні переважає весняний стік. Середньобагаторічна витрата води біля смт Щирець становить 1,60 м³/с, а модуль стоку – 5,21 дм³/с з 1 км². Максимальні витрати властиві для весняного періоду, мінімальні витрати води найчастіше спостерігають у другій половині травня, червні або у вересні-жовтні [7].

Весняна повінь проходить у березні, найвищий рівень сягає 1–2 м над умовним рівнем води при звичайній повені і 2,9–3,0 м при виключно високій повені (1912, 1929, 1940, 1948, 1966, 1980, 1998 і 2020 рр.). У маловодні роки висота максимуму не перевищує 0,3 м. У багатоводні роки підтоплюються села Дмитре, Гонятичі і Вербіж.

На початку квітня настає межень, що продовжується до жовтня-листопада, з найнижчими рівнями у травні чи вересні. Амплітуда коливань середньорічної межені досягає 42 см. Хід меженних рівнів спотворюється попусками через греблю, а також заростанням ріки. Крім того, межень неодноразово (два-три рази) у червні-серпні порушується інтенсивними дощовими паводками висотою 0,5–1,0 м над умовним

[7] Геоекологія Щирецького водосховища / Андрейчук Ю., Біланюк В., Бота О. та ін. / за заг. ред. Є. Іванова та О. Пилипович. Львів : ЛНУ ім. І. Франка, 2024. 116 с.

рівнем води, у багатоводні роки – 2,3 м над передпаводковим. Зимова межень (грудень-лютий) нестійка, часто порушується підйомами рівня висотою до 1,8–2,6 м над умовним, викликаними відлигами. Температура повітря при відлигах становить 8–10 °С. Найнижчі рівні настають у кінці грудня – початку січня, зазвичай вони на 5–8 см нижчі побутових рівнів.

Льодовий режим ріки нестійкий, а суцільний льодостав буває не щорічно; нерідко посеред зими має місце скресання річки, льодохід, ополонки і повне очищення від льоду. Загальна тривалість періоду із льодовим явищами від 17 до 102 діб. Замерзання починається у середині грудня, зазвичай із появи заберегів. В третій декаді грудня, інколи на початку грудня встановлюється льодостав. Скресання ріки проходить на початку березня, інколи на початку лютого або у кінці березня, йому передує поява промоїн. Весняний льодохід триває 2–7 дні, проходить зазвичай при високих рівнях води, інколи співпадає із піком повені.

Плюсову температуру води спостерігають з березня по листопад. У березні вона не перевищує 2,5–3,0 °С, у квітні дорівнює 4–9 °С, у травні – 10–14 °С, у червні – 15–18 °С. Від червня до липня температура води зростає на 2–3 °С. Максимальна температура в окремі дні досягає 27–29 °С. З липня починається зниження температури води, найрізкіше зниження температур спостерігають у вересні і жовтні – до 6–9 °С, у листопаді – до 3–7 °С, у грудні – до 0–3 °С.

До головних гідрологічних параметрів поверхневого стоку належать дані про максимальний, середньорічний (включно з внутрішньорічним розподілом) та мінімальний стік. Максимальний стік формують дощові паводки, приймемо за розрахункові такі максимальні витрати води (табл. 5). Максимальні витрати води у створі 4 різко зменшуються у зв'язку з суттєвим впливом розташованого вище за течією водосховища, яке виконує регулюючу функцію.

Таблиця 5

Максимальні витрати води водотоків

Назва ріки	Створ	F, км²	Розрахункові максимальні витрати води, дм³/с				
			$Q_{1\%}$	$Q_{2\%}$	$Q_{5\%}$	$Q_{10\%}$	$Q_{25\%}$
Щирка	1	24,9	17,2	12,4	7,91	5,25	2,72
Малечковича	2	29,0	19,7	14,2	9,06	6,01	3,11
Ковир	3	13,4	10,1	7,27	4,65	3,08	1,60
Щирка	4	74,5	21,9	15,8	10,1	6,68	3,47

Середньорічний стік є інтегральним показником водних ресурсів території водозбору, тому подаємо середньорічні витрати води на досліджуваних водотоків різної ймовірності перевищення (табл. 6). Неузгодженість середньорічного стоку між прихідною частиною стоку (сумарно створи 1, 2, 3) і витратною (створ 4) пояснюємо не врахованим поверхневим і підземним стоком у водойму через наявну додаткову водозбірну площу (7,2 км^2), що примикає до неї і не належить до річок, проте безпосередньо формує і віддає стік у водосховище (рис. 3).

Таблиця 6

Середньорічні витрати води водотоків та їхня мінливість

Назва ріки	Створ	F, км^2	Середньорічний стік забезпеченістю P%, м^3/с			
			$Q_{50\%}$	$Q_{75\%}$	$Q_{80\%}$	$Q_{95\%}$
Щирка	1	24,9	0,130	0,092	0,085	0,069
Малечковича	2	29,0	0,151	0,107	0,099	0,080
Ковир	3	13,4	0,070	0,049	0,046	0,037
Щирка	4	74,5	0,388	0,274	0,254	0,206

Мінімальні витрати води належать до головних гідрологічних параметрів, які використовують при проєктуванні та будівництві різних водозабірних гідротехнічних споруд. Від них залежить встановлення величини санітарного стоку, розрахунок гранично допустимих скидів тощо. Мінімальні витрати води розраховують аналогічно до середньорічних на основі даних гідропоста-аналога, а потім їх моделюють у розрахункові створи. Попередньо визначені мінімальні витрати води перенесено у розрахункові створи згідно із даними модуля стоку та з врахуванням даних польового гідрологічного дослідження (табл. 7).

Для підтримання нормальних біологічних і санітарних умов життя водотоку повинен залишатися санітарний мінімум, трактування розміру якого, станом на сьогодні, неоднозначне. розраховану санітарну витрату води у створах подано у табл. 8. Виходячи із положення про санітарний мінімум, будь який проєктний забір води із досліджуваних водотоків може здійснюватися за обов'язкової умови збереження санітарної витрати в основному руслі та дотримання усіх норм і вимог Водного кодексу України.

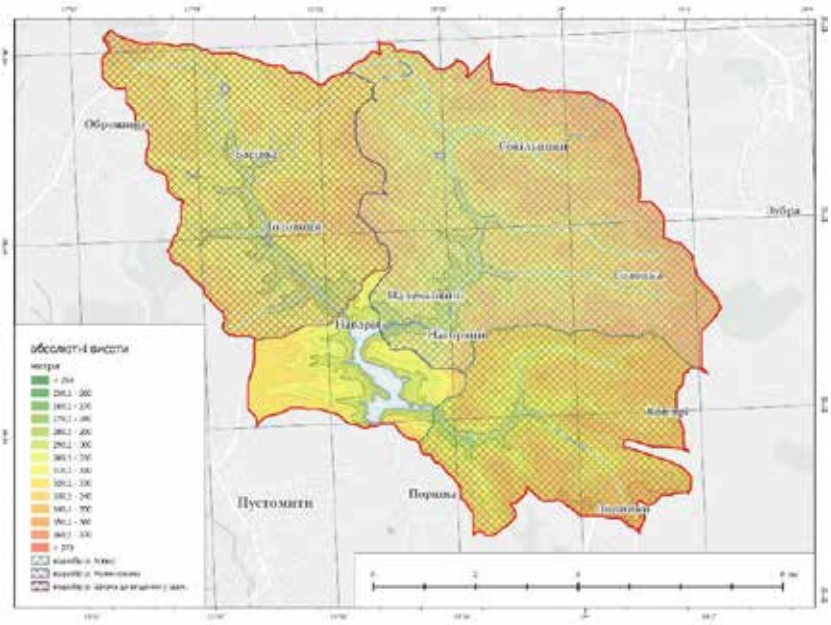


Рис. 3. Водозбірні площі допливів Щирецького водосховища

Таблиця 7

Мінімальні витрати води водотоків

Назва ріки	Створ	F, км²	Мінімальні витрати (середні за 30 діб), дм³/с			
			$Q_{75\%}$	$Q_{80\%}$	$Q_{95\%}$	$Q_{97\%}$
Щирка	1	24,9	44,6	41,3	31,6	29,1
Малечковича	2	29,0	51,9	48,1	36,8	33,9
Ковир	3	13,4	24,0	22,2	17,0	15,7
Щирка	4	74,5	133	124	94,6	87,2

Таблиця 8

Санітарні витрати води водотоків

Назва ріки	Створ	F, км²	Санітарний стік, дм³/с	
			$Q_{мін.95\%}$	Q санітарна
Щирка	1	24,9	31,6	23,7
Малечковича	2	29,0	36,8	27,6
Ковир	3	13,4	17,0	12,8
Щирка	4	74,5	94,6	71,0

Водний баланс водосховища є співвідношенням надходження витрат та акумуляції води в межах водойми за певний проміжок часу. Він залежить від різних чинників: геоморфологічної будови території водозбору, гідрологічного режиму, кліматичних умов, наявності гідротехнічних споруд, інтенсивності антропогенної діяльності тощо. Згідно з дозволом на спецводокористування головним водоспоживачем є ЛМКП «Львівтеплоенерго». Ліміт забору води із водосховища становить 5600,05 м^3/добу (1725,4 тис. м^3/рік). Витратна частина є більшою за прихідну на 1818,2 тис. м^3 (або на 12,4 %). Це означає, що для утримання сталого НПР слід проводити багаторічне регулювання стоку.

4. Гідрохімічний і санітарно-гігієнічний стан водосховища

Для виявлення забруднення Щирецького водосховища нами використано дані моніторингу Дністровського басейнового управління водних ресурсів за 2022 р., яке здійснює спостереження за забрудненням у р. Щирка перед впадінням у водосховище, та дані лабораторії ТОВ «Компанія «Центр ЛТД» якою проведено гідрохімічні і санітарно-гігієнічні дослідження якості вод у водоймі і притоках, які живлять водосховище у 2023 р.[8]. Проби води, донних відкладів і ґрунтів відібрано у досліджуваних точках (рис. 4).

Більшість проб були прозорі, без кольору і сторонніх запахів. Лише проба Т.В. 9 мала світло-жовтий колір і ледь відчутний запах, а проба Т.В.10 – сірий колір і відчутний запах каналізації. За значенням pH вода в усіх пробах належать до нейтральних, з наближенням до слаболужної реакції.

Мінералізація води у водосховищі коливається від 382 мг/дм^3 (Т.В.1) до 839,6 мг/дм^3 (Т. В.3). Найнижчим і близьким до природного мінеральний склад у руслі р. Щирка зафіксовано перед впадінням у водойму. Найвищий показник мінералізації відзначено у р. Малечковича, де є значне забруднення водотоку стічними водами. У центральній частині водосховища мінералізація становить 455,4 мг/дм^3.

Вміст показників сольового складу відповідає нормативам в усіх пробах якщо брати до уваги ГДК для господарсько-побутових вод, однак є перевищення за вмістом сульфатів рибогосподарських норм у пробі води з р. Малечковича (Т.В.3), незначне перевищення у пробі води з р. Ковир та у водосховищі. У пробі води з р. Малечковича норму перевищує вміст кальцію.

[8] Геоекологія Щирецького водосховища / Андрейчук Ю., Біланюк В., Бота О. та ін. / за заг. ред. Є. Іванова та О. Пилипович. Львів : ЛНУ ім. І. Франка, 2024. 116 с.

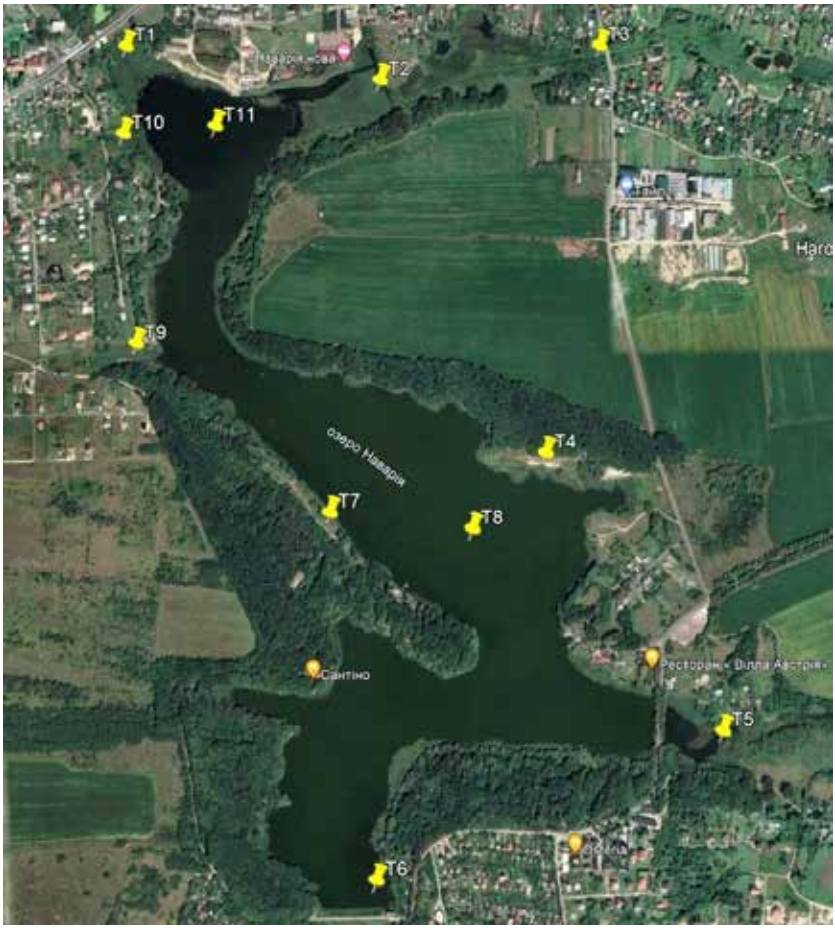


Рис. 4. Точки відбору проб поверхневих вод, донних відкладів і ґрунтів в екосистемі Щирецького водосховища

Значення $БСК_5$ в усіх пробах мають відхилення від рибогосподарських норм, найбільше – у р. Малечковича (у 2,5 рази) та у каналі без назви (Т.В.10), що тече від с. Наварія – у 9,4 рази (рис. 6). В пробах зафіксовано найвищі значення ХСК і перманганатної окисності та найнижчі концентрації розчиненого кисню[9].

[9] Геоекологія Щирецького водосховища / Андрейчук Ю., Біланюк В., Бота О. та ін. / за заг. ред. Є. Іванова та О. Пилипович. Львів : ЛНУ ім. І. Франка, 2024. 116 с.

Результати моніторингу компанії «Центр ЛТД» узгоджені із даними Дністровського басейнового управління водних ресурсів. Згідно цих даних середньорічна концентрація $БСК_5$ у 2022 р. становила 4,12 мг/дм^3 (за норми 3 мг/дм^3)[10]. Максимальні показники $БСК_5$ зафіксовано у липні 2022 р. і становили 5,76 мг/дм^3, що у двічі перевищує показник ГДК (рис. 5).

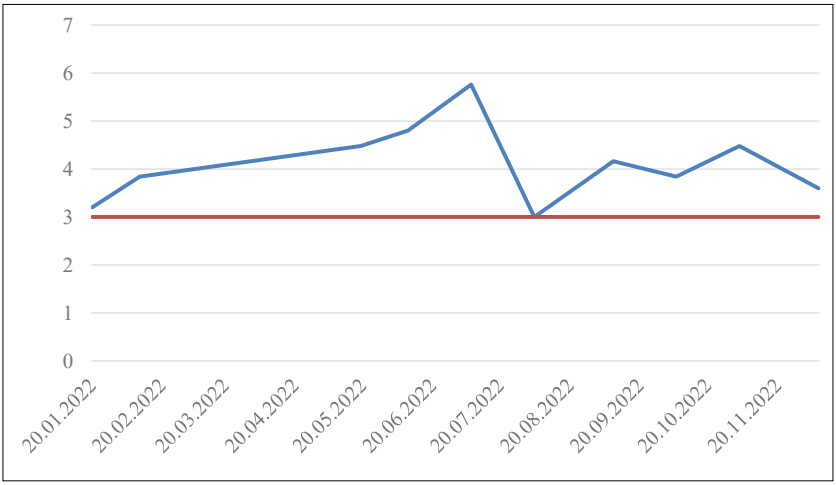


Рис. 5. Динаміка $БСК_5$ у р. Щирка у місці впадіння у водосховище

Джерело: на основі даних Басейнового управління водних ресурсів

Вміст азоту амонійного в усіх пробах є вищим за рибогосподарські норми, а в двох каналах і за господарсько-побутові норми, що свідчить про потрапляння у водосховище забруднення комунально-побутових стоків. Наприклад, у Т.В.10 вміст азоту амонійного перевищує норму аж у 95 разів. В усіх пробах виявлено сліди нітратів, а нітрити у р. Малечковича – в 1,1 рази, у каналі без назви – в 4,0 рази. Забруднення нітритами підтверджують дані Дністровського басейнового управління водних ресурсів згідно з якими середня концентрація нітритів у р. Щирка перед впадінням у водосховище становила 0,12 мг/дм^3, максимальна – 0,15 мг/дм^3, при ГДК – 0,08 мг/дм^3. Вміст фосфатів перевищує норму у каналі без назви – в 6,13 рази[11].

[10] Дністровське басейнове управління водних ресурсів. *Державне агентство водних ресурсів.* URL: https://vodaif.gov.ua/; Open Access. Environmental. Мапи. URL: http://openenvironment.org.ua/water/

[11] Геоекологія Щирецького водосховища / Андрейчук Ю., Біланюк В., Бота О. та ін. / за заг. ред. Є. Іванова та О. Пилипович. Львів : ЛНУ ім. І. Франка, 2024. 116 с.

Вміст важких металів є нижчим від чутливості методів визначення, за винятком заліза і марганцю. Їх концентрація в усіх пробах перевищує показник ГДК рибогосподарського значення. Максимальну концентрацію цих металів виявлено у пробах води з каналу без назви. Вона перевищує норму для заліза загального – в 28 разів і марганцю – в 56 разів. Їхня наявність у воді пов'язана і господарською діяльністю населення, і розмноженням синьо-зелених водоростей. У трьох пробах (Т.В.3, 11 і 10) зафіксовано підвищений вміст цинку, а в обох пробах з р. Малечковича – перевищення за вмістом кадмію (2,6–3,6 рази). Зазначимо, що у гирлі р. Малечковича (Т.В.2) його вміст менший, що може бути пов'язано з поступовим перемішуванням вод.

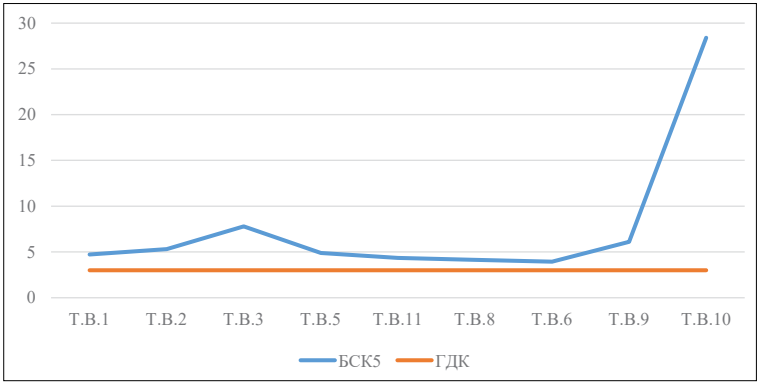


Рис. 6. Концентрація $БСК_5$ у відібраних пробах води, у мг/дм^3

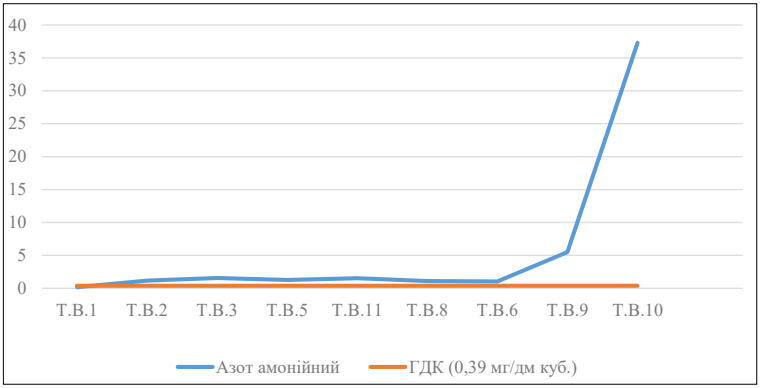


Рис. 7. Концентрація азоту амонійного у відібраних пробах води, у мг/дм^3

Найгірша якість води за мікробіологічними показниками є у р. Щирка перед впадінням у водосховище, р. Малечковича (с. Малечковичі) та в обох впускних каналах. Загалом, кишкові палички є санітарно-показовими (індикаторними) мікроорганізмами фекального забруднення досліджуваного водного об'єкту, а їх кількість визначає ступінь забруднення поверхневих вод, наявність патогенних ентеробактерій, у тім числі сальмонели та коліфагів (бактеріальних вірусів, виявлення яких може свідчити про наявність патогенних вірусів) (рис. 8). У пробах вод відхилень на період досліджень не спостерігали.

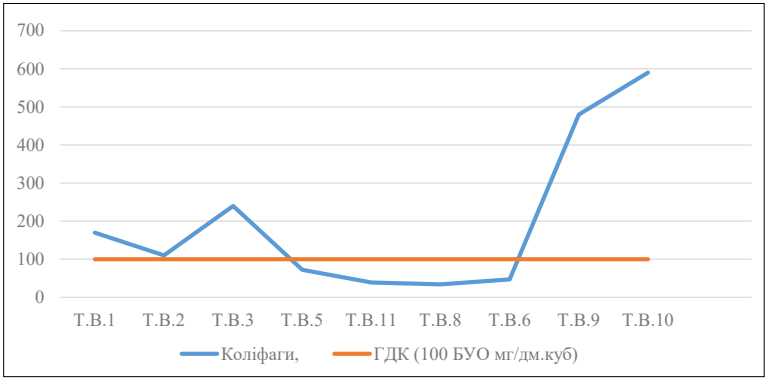


Рис. 8. Концентрація коліфагів у відібраних пробах води, у мг/дм^3

Для донних відкладів гранично допустимі норми не встановлені, тому отримані результати порівнювалися з гранично допустимими концентраціями, які встановлені для ґрунтів. За візуальним спостереженням відібрані зразки різного мінерального складу. Проби відібрані у Т.В.8 і 9 містили значну кількість піску, у Т. В. 1, 2, 5 і 10 – гумусових речовин. Вміст рухомих форм важких металів і нафтопродуктів, у більшості зразків не перевищує допустимих норм. Вміст нафтопродуктів нижче чутливості вибраної методики аналізу, а рухомі форми важких металів виявлені у незначних кількостях, за винятком марганцю і цинку. Вміст марганцю вище норми у 1,0–1,5 рази, а цинку – у 1,14 разів[12].

[12] Геоекологія Щирецького водосховища / Андрейчук Ю., Біланюк В., Бота О. та ін. / за заг. ред. Є. Іванова та О. Пилипович. Львів : ЛНУ ім. І. Франка, 2024. 116 с.

5. Поселенське навантаження і водокористування

Розташування, а також площа та кількість населених пунктів є одним з найважливіших чинників антропогенного навантаження на водойми. В межах водозбору Щирецького водосховища розташовані дев'ять поселень, а саме села Сокільники, Солонка, Нагоряни, Наварія, Годовиця, Басівка, Ков'ярі, Скнилів і Липники Львівського району Львівської області (рис. 9). Щільність населення у водозборі водосховища у середньому становить 300–400 осіб/км^2 і може перевищувати 600 осіб/км^2. Ця територія належить до північної частини басейну р. Щирка і приміської зони Львова, відзначається високою густотою населення та швидким зростанням його чисельності. Наприклад, чисельність населення с. Сокільники зросла від 2001 р. на 5366 осіб (рис. 10).

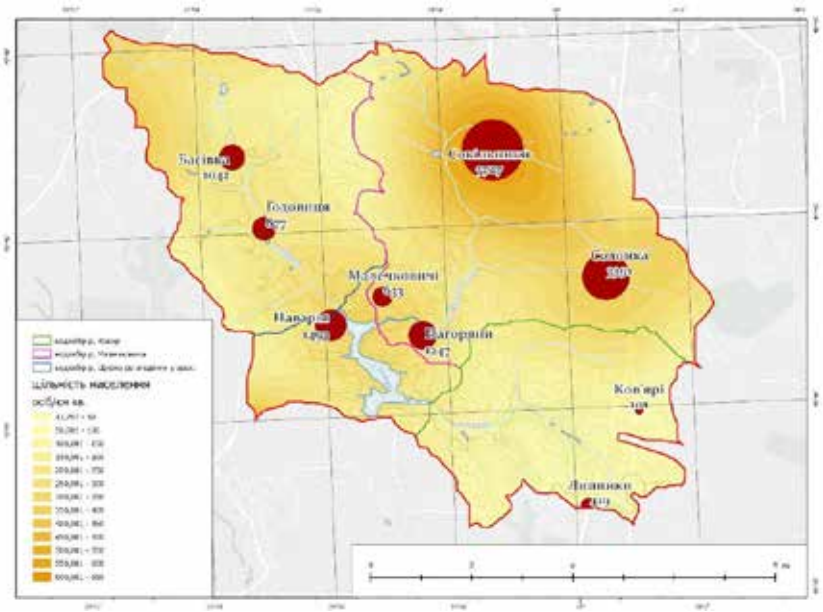


Рис. 9. Чисельність і щільність населення у водозборі Щирецького водосховища у розрізі суббасейнів

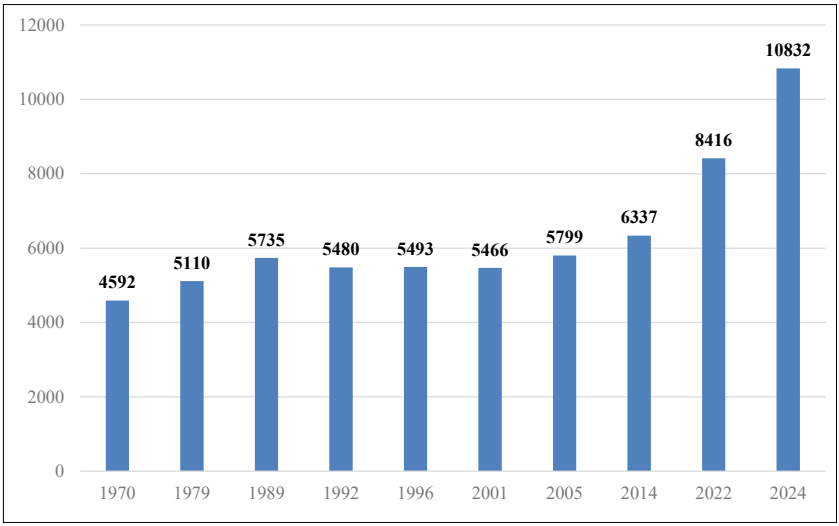


Рис. 10. Динаміка чисельності населення у селі Сокільники

Джерело: згідно даних Державної служби статистики України)

Згідно з даними порталу «Львівщина: люди в дії» Сокільники є лідером серед сільських громад Львівської області за загальною площею прийнятого в експлуатацію житла у 2022 р. Тут офіційно здали понад 37,0 тис. м^2 житлової нерухомості (для порівняння, в усьому Дрогобицькому районі цього ж року прийняли в експлуатацію житла 29,7 тис. м^2 житла)[13].

Такі ж зміни відбуваються і в інших населених пунктах у водозборі водосховища, наприклад, застосунок Google Earth Pro дозволяє простежити як зростає площа під забудовою у селах Нагоряни і Поршна (рис. 11).

Сьогодні, централізованим водопостачанням в окремих житлових масивах забезпечено лише 50 % сільських мешканців. Розхід води для району, що охоплений централізованим водопостачанням становить 750 м^3/добу. Частина мешканців використовує воду з колодязів і свердловин. У Сокільниках система централізованого водовідведення відсутня. Більшість мешканців користується вбиральнями з вигрібними ямами і септиками. Окремі житлові будинки по вул. Грушевського підключено до каналізаційної мережі по вул. Стрийській (м. Львів).

[13] Lviv. Media. Які села Львівщини зростають найшвидше? Рейтинг сільських громад за темпами будівництва житла. URL: https://lviv.media/lvivshchyna/80879-top-5-sil-lvivshini-za-tempami-i-rivnem-rozvitku/

Рис. 11. Зростання площ під забудовою в околицях Щирецького водосховища станом на 2009 р. (а) і 2022 р. (б)

Джерело: на основі космознімків Google Earth Pro

Частина забудови вулиць Шевченка і Львівської приєднано до каналізаційної системи м. Львова, у районі вул. Трускавецької. Сільський громадський центр, школа і лікарня мають локальну систему каналізації, яка перекачує стоки у колектор м. Львова. За ініціативою мешканців побудовані

самотічні колектори житлового масиву Сонячний, вулиць Львівська і Шевченка, неочищені стоки потрапляють у р. Малечковича, а далі у Щирецьке водосховище[14]. Отож, водойма є джерелом водопостачання та приймачем стічних вод. На екологічний стан поверхневих вод водосховища впливає забруднення комунально-побутовими і промисловими стоками та твердим побутовим сміттям; забруднення ґрунтів й атмосферного повітря; а також зміна ландшафтної структури водозбору тощо.

Головним водокористувачем водосховища є ЛМКП «Львівтеплоенерго». Згідно з дозволом на спеціальне водокористування ліміт забору води становить 5600,05 м^3/добу, або 1725,4 тис. м^3/рік. У 2022 р. забір води з водосховища становив 1034,7 тис. м^3/рік.

У річку Щирка: ТзОВ «Транс-Сервіс-1» із лімітом скидів у 25,42 тис. м^3/рік, у 2022 р. обсяги скидів становили 22,8 тис. м^3/рік; ПП «Торговий Дім «Орбіта», ліміт скидів – 14,49 тис. м^3/рік, обсяги скидів – дані відсутні;

У річку Малечковича: ТзОВ «Озеро», ліміт скидів – 9,11 тис. м^3/рік, обсяги скидів – 9,0 тис. м^3/рік; ТзОВ «Н. П.Б.», ліміт скидів – 16,34 тис. м^3/рік, обсяги скидів – дані відсутні.

У річку Ковир: Квартирно-експлуатаційний відділ м. Львова, ліміт скидів – 90,91 тис. м^3/рік, обсяги скидів – 16,2 тис. м^3/рік; АТ «Галнафтогаз», ліміт скидів – 4,579 тис. м^3/рік, обсяги скидів – 1,7 тис. м^3/рік.

Окрім офіційних суб'єктів господарювання, які мають дозволи на скиди, у річки і канали, що живлять Щирецьке водосховище скиди здійснюють приватні домогосподарства. Обсяги скидів невідомі через те, що поселення Сокільники, Солонка, Годовиця, Наварія і Малечковичі не мають системи централізованого водовідведення. Ми розрахували обсяг стічних вод, що потрапляють у водотоки суббасейну р. Щирка до впадіння у водосховище. В межах суббасейну проживало 3412 осіб, а норма споживання води для мешканців приватного сектору без централізованої подачі гарячої води становить 6,3 м^3/місяць[15], скид стічних вод – 21 495,6 м^3 у місяць, або 257 947,2 м^3 у рік, що у тричі перевищує дозволений скид у водосховище. Якщо врахувати скиди у суббасейни річок Малечковича і Ковир, обсяги скидів будуть суттєво

[14] Пилипович О., Іванов Є., Андрейчук Ю., Голубєв Ю., Жовтянський О. Антропогенне навантаження на водозбір Щирецького водосховища. *Наук. записки Тернопіл. націон. педагог. ун-ту ім. В. Гнатюка. Сер.: Геогр.* 2024. № 1 (56). С. 160–168. DOI: https://doi.org/10.25128/2519-4577.24.1.19

[15] Норми споживання води для мешканців приватного сектора. URL: https://kyiv.poverka.net.ua/normy-spozhyvannya-vody-ukrayina/

вищими. Це підтверджується результатами гідрохімічного моніторингу, які виявили перевищення вмісту забруднюючих речовин і пригнічений стан біоти у річках і каналах, які впадають у водосховище.

6. Структура землекористування у водозборі водосховища

Як видно із старих австрійських і польських карт, коли ще не існувало водосховища, околиці території досліджень були малозаліснені, а основним типом антропогенного впливу на природні геосистеми залишалося поселенське навантаження. На сьогодні, територія досліджень належить до приміської зони Львова, а також до Львівської агломерації. З огляду на те, що будь яка міська агломерація здійснює вирішальний перетворюючий антропогенний вплив на навколишнє природне середовище, видозмінюючи її економічну структуру та соціальні аспекти життя населення, ці ж процеси спостерігаємо довкола водосховища[16].

Картографічна інформація суттєво допомагає, а інколи й слугує основою дослідження як умов формування і розвитку природних геосистем, так і їхньої антропогенної трансформації. Важливими для відтворення ретроспективи прояву природно-антропогенних процесів є картографічні джерела. Зокрема, їх можна використати для аналізу розміщення, функціонування, стану і розвитку різнофункціональних природно-господарських систем, вивчення тогочасних топонімів географічних об'єктів.

Для вдалої інтерпретації картографічної інформації слід обрати масштаб дослідження. Вивчення умов виникнення і формування сучасних ландшафтів території Щирецького водосховища та його околиць найкраще проводити за допомогою топографічних карт масштабного ряду від 1 : 25 000 до 1 : 50 000. На основі опрацювання картографічних фондів кабінету картографії Львівської національної наукової бібліотеки ім. В. Стефаника, Центрального державного історичного архіву України у Львові та інтернет-джерел картографічного спрямування (https://mapire.eu; http://www.mapywig.org; https://maps.vlasenko.net та ін.) підібрано топографічні карти для п'яти історичних зрізів, що дали змогу охопити часовий період у понад 200 років [17]:

1) австрійську карту Першого топографічного знімання, складену під час проведення Йосифинської метрики (1779–1783) масштабу 1 : 28 800 (рис. 12);

---

[16] Лозинський Р., Костюк І. Сучасні межі Львівської агломерації. *Наук. записки Тернопіл. націон. педагог. ун-ту ім. В. Гнатюка. Сер.: Геогр.* 2011. № 2. С. 55–60.

[17] Пилипович О., Іванов Є., Андрейчук Ю., Голубєв Ю., Жовтянський О. Антропогенне навантаження на водозбір Щирецького водосховища. *Наук. записки Тернопіл. націон. педагог. ун-ту ім. В. Гнатюка. Сер.: Геогр.* 2024. № 1 (56). С. 160–168. DOI: https://doi.org/10.25128/2519-4577.24.1.19

Рис. 12. Територія дослідження на австрійській карті Першого топографічного знімання, складеній під час проведення Йосифинської метрики (1779–1783), масштаб 1 : 28 800

2) австрійську карту Другого топографічного знімання, складену під час проведення Францисканської метрики (1819–1820) масштабу 1 : 28 800 (рис. 13);

Рис. 13. Територія дослідження на австрійські карті Другого топографічного знімання, складені під час проведення Францисканської метрики (1819–1820), масштаб 1 : 28 800

3) австрійську карту Третього топографічного знімання (1869–1887) масштабу 1 : 25 000 (рис. 14);

Рис. 14. Територія дослідження на австрійській карті Третього топографічного знімання (1869–1887), масштаб 1 : 25 000

4) польські карти Військового географічного інституту, WIG (1924–1939) масштабу 1 : 100 000 (рис. 15; на жаль топографічний лист масштабу 1 : 25 000 для території дослідження залишили не оновленим).

Рис. 15. Територія дослідження на польській карті, яку зібрано з окремих листів видавництва Військового географічного інституту, WIG (1924–1939), масштаб 1 : 100 000

Тож розглянемо трансформаційні зміни у структурі землекористування на основі цих картографічних творів. Як вище зазначено, постійно діючої великої водойми на місці сучасного Щирецького водосховища не існувало. Натомість у різні роки, особливо у XIX ст., функціонував ряд невеликих ставів у долині річок Щирка, Малечковича і Ковир. Найбільшою з цих водойм є став на Ковирку (Ковирський), таку назву мала р. Ковир у XIX ст. Місце розміщення й наповнення ставів змінюється залежно від історичного зрізу, що підтверджує динамічність змін водних об'єктів у районі дослідження. Слід відзначити, що у місці злиття річок Щирка і Ковир практично весь досліджуваний історичний період існувала дамба, діяли водяний млин, папірня (паперова фабрика) та інші водоспоживаючі об'єкти. На жаль, але майже усі стави перед Другою світовою війною спущено. Ділянки долини, які не перебували під водоймами залишалися заболоченими і сильно перезволоженими.

Найкраще напрям перетворення природних умов території водозбору відображають зміни у річковій мережі. Результати аналізу картографічних матеріалів XVIII–XX ст. засвідчують повільне обміління й пересихання річок і потічків.

Важливими показниками трансформації природного середовища вважаємо частки залісненості і заболоченості території. Відзначимо загальні тенденції до зменшення заліснених і заболочених площ, однак процес їхнього скорочення відбувався по-різному. За останні 200 років відзначимо суттєве скорочення заліснених площ, які за досліджуваний період зменшилися на понад 20 %. Значно скорочені також й землі під чагарниками, пасовищами і сіножатями. Здебільшого заболочені і перезволожені площі трапляються у долинах Щирця, а також у межах його дрібних і малодіяльних приток. На відміну від заліснених, частка заболочених земель зменшилася лише на 1,5–2,0 %.

У 2021 р. серед переліку власників (користувачів) земельних ділянок, які входять в межі Державного акту на право постійного користування ЛМКП «Львівтеплоенерго» (Щирецьке водосховище) 79,0 % території перебуває у приватній, 18,2 % – у комунальній і лише 2,1 % – у державній власності.

У структурі землекористування водозбірної площі Щирецького водосховища найбільші площі займають землі під ріллею, які становлять 18,7 км^2 (25,3 % від водозбірної площі), лісовими масивами охоплено 8,2 км^2 (11,1 %), під забудовою – 8,8 км^2 (12 %), під садами – 0,6 км^2 (0,8 %). Якщо аналізувати структуру земель для водозборів річок, що впадають у Щирецьке водосховище, то найбільші площі ріллі зосереджені у басейні р. Малечковича (30,1 %), а дещо менші площі

(20 %) у басейнах річок Щирка і Ковир. Найзалісненішим є басейн р. Щирка, тут лісами зайнято 23,8 % від площі водозбору. Незначні площі лісів у загальній площі водозбору (14,6 %) зафіксовано у басейні р. Ковир, а найменші (0,63 %) – у басейні р. Малечковича (рис. 16). Найбільші площі земельних угідь під забудовою зосереджені у басейні р. Малечковича (16,0 %), а найменші – у басейні р. Щирка – 6,9 %. У всіх басейнах річок малою є частка земель під садами (до 2,0 %).

Також достатньо високим є транспортне навантаження на геосистеми водозбору. У верхів'ї Щирки щільність доріг коливається від 0 до 6,9 км/км^2, це пов'язано, як залісненням верхів'я так і з тим, що територія належить до приміської зони з розгалуженою мережею автодоріг.

З огляду на те, що Львівська агломерація розширюється й ці процеси продовжаться у післявоєнний період, можемо припускати, що у вказаних басейнових системах зростатимуть площі земель під забудовою, а зменшаться площі сільськогосподарських земель. У 2009–2020 рр. швидко зросла частка забудови на землях, які використовували для сільського господарства.

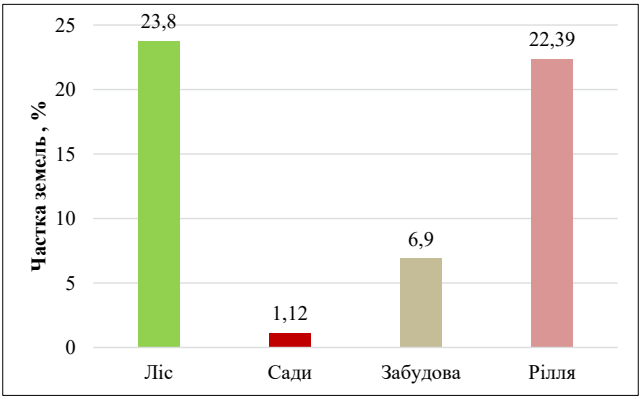
ВИСНОВКИ

На основі гідроекологічних досліджень у водозборі Щирецького водосховища та в межах його водозбору зроблено такі висновки:

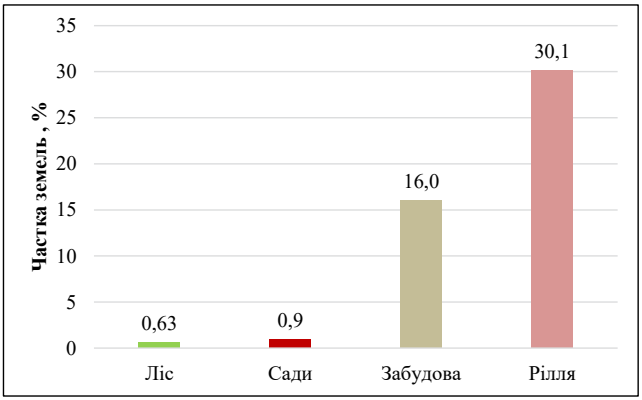
1. Щирецьке водосховище розташоване на південний-захід від міста Львів, у 3,95 км від об'їзної траси міста. Адміністративно територія водойми належить до села Наварія Львівського району Львівської області. Водосховище створено у руслі р. Щирка у 1954 р. Головним її призначенням є наповнення системи технічного водопостачання Львівської ТЕЦ-1.

2. Водосховище при нормальному підпірному рівні має площу 1,15 км^2, об'єм води – 4,15 млн м^3, максимальна глибина водойми – 7,8 м. Ложе водосховища має витягнуту з півночі на південь форму з відмітками дна від 286,58 м у його північній і до 280,79 м – у південній частині.

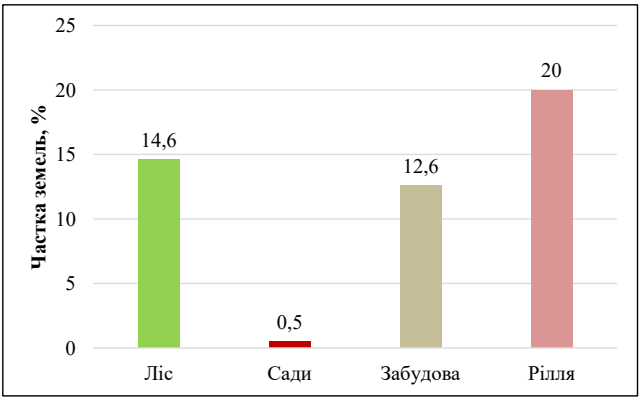
3. Гідрологічні дослідження Щирецького водосховища здійснено на основі даних стаціонарного гідрологічного поста на р. Щирка (смт Щирець) і даних польових досліджень на чотирьох створах спостережень. Витрати весняної повені на р. Щирка є незначними, тому максимальний стік розрахований лише для дощових паводків і становить 21,9 м^3/с. Модуль середньорічного стоку складає 0,21 м^3/с. Мінімальні середньомісячні витрати не перевищують Максимальні витрати води для різних років водозабезпечення властиві для березня, а мінімальні – для липня і серпня.



а)



б)



в)

Рис. 16. Частка земель у загальній площі водозборів річок:
а) р. Щирка; б). р. Малечковича; в) р. Ковир

4. На основі гідрохімічної і санітарно-гігієнічної оцінки якості поверхневих вод зроблено висновок, що найзабрудненішою є р. Малечковича (с. Малечковичі). Тут зафіксовано перевищення вмісту органічних речовин ($БСК_5$), сульфатів, кальцію, азоту амонійного, нітритів, заліза загального, кадмію, марганцю, цинку та невідповідність за бактеріологічними показниками. Незадовільною є якість води у двох каналах, де зафіксовано перевищення допустимих норм за усіма вищезазначеними показниками. У пробах вод з власне водосховища виявлено перевищення рибогосподарських норм $БСК_5$, азоту амонійного, заліза загального, марганцю і сульфатів. Відхилень за бактеріологічними показниками не виявлено.

5. Головними видами антропогенного впливу на водозбір Щирецького водосховища є поселенське (щільна забудова, площинний змив, скиди побутових вод) та сільськогосподарське навантаження (головно рільництво). Водосховище є джерелом водопостачання і приймачем стічних вод. Головним користувачем водосховища є ЛМКП «Львівтеплоенерго». У структурі землекористування водозбірної площі водосховища найбільші площі займають землі під ріллею, що становлять 18,7 км^2, лісовими масивами охоплено 8,2 км^2 земель, під забудовою – 8,8 км^2, під садами – 0,6 км^2. Львівська агломерація розширюється, тому зростає площа земель під забудовою і зменшується площа сільськогосподарських земель.

АНОТАЦІЯ

Щирецьке водосховище створене у руслі р. Щирка в 1954 р. та розташоване в адміністративних межах села Наварія Пустомитівської міської територіальної громади Львівського району Львівської області та належить до блакитної інфраструктури Львівської агломерації. Водойма при нормальному підпірному рівні має площу 1,15 км^2, об'єм води – 4,15 млн м^3, а максимальна глибина – 7,8 м. Модуль середньорічного стоку становить 5,21 дм^3/с.

Проведено комплексне гідроекологічне обстеження території водозбору Щирецького водосховища, зокрема гідрологічні, гідрохімічні і санітарно-гігієнічні дослідження водойми з метою виявлення джерел забруднення та оцінювання сучасного екологічного стану та ступені антропогенної трансформації прилеглої до неї території.

Водними об'єктами із незадовільною якістю води є р. Малечковича та два канали. В них зафіксовано значне перевищення вмісту органічних речовин ($БСК_5$), сульфатів, кальцію, азоту амонійного, нітритів, заліза загального, кадмію, марганцю, цинку та невідповідність за бактеріологічними показниками. У пробах вод Щирецького водосховища

виявлено перевищення рибогосподарських норм $БСК_5$, азоту амонійного, заліза загального, марганцю і сульфатів. Відхилень за бактеріологічними показниками не виявлено.

Головними видами антропогенного впливу на водозбір Щирецького водосховища є поселенське (щільна забудова, площинний змив, скиди побутових вод) та сільськогосподарське навантаження (головно рільництво). У структурі землекористування водозбірної площі водосховища найбільші площі займають землі під ріллею, що становлять 18,7 км^2, лісовими масивами охоплено 8,2 км^2 земель, під забудовою – 8,8 км^2, під садами – 0,6 км^2. Львівська агломерація розширюється, тому в майбутньому продовжать зростати площі земель під багатоповерховою та приватною забудовою, а зникатимуть площі лісо- і сільськогосподарських земель.

Література

1. Геоекологія Львівської області : монографія / Ю. Андрейчук, Л. Безручко, В. Біланюк та ін. / за заг. ред. Є. Іванова. Львів : Простір-М, 2021. 606 с.
2. Геоекологія Щирецького водосховища : монографія / Ю. Андрейчук, В. Біланюк, О. Бота та ін. ; за заг. ред. Є. Іванова та О. Пилипович. Львів : ЛНУ ім. І. Франка, 2024.
3. Дністровське басейнове управління водних ресурсів. *Державне агентство водних ресурсів*. URL: https://vodaif.gov.ua/
4. Ковальчук І. П. Регіональний еколого-геоморфологічний аналіз. Львів : Ін-т українознавства, 1997.
5. Лозинський Р., Костюк І. Сучасні межі Львівської агломерації. *Наук. записки Тернопіл. націон. педагог. ун-ту ім. В. Гнатюка. Сер.: Геогр.* 2011. № 2. С. 55–60.
6. Моніторинг та екологічна оцінка водних ресурсів України / Державне агентство водних ресурсів України. URL: http://monitoring.davr.gov.ua/EcoWaterMon/GDKMap/Index
7. Норми споживання води для мешканців приватного сектора. URL: https://kyiv.poverka.net.ua/normy-spozhyvannya-vody-ukrayina/
8. Пилипович О., Іванов Є., Андрейчук Ю., Голубєв Ю., Жовтянський О. Антропогенне навантаження на водозбір Щирецького водосховища. *Наук. записки Тернопіл. націон. педагог. ун-ту ім. В. Гнатюка. Сер.: Геогр.* 2024. № 1 (56). С. 160–168. DOI: https://doi.org/10.25128/2519-4577.24.1.19
9. Пилипович О., Ковальчук І. Геоекологія річково-басейнової системи верхнього Дністра : монографія / за наук. ред. І. П. Ковальчука. Львів – Київ : ЛНУ ім. Івана Франка, 2017.

10. Lviv. Media. Які села Львівщини зростають найшвидше? Рейтинг сільських громад за темпами будівництва житла. URL: https://lviv.media/lvivshchyna/ 80879-top-5-sil-lvivshini-za-tempami-i-rivnem-rozvitku/

11. Open Access. Environmental. Мапи. URL: http://openenvironment.org.ua/water/

Information about the authors:
Ivanov Yevhen Anatoliiovych,
Doctor of Geographical Sciences, Professor,
Head of the Department of Constructive Geography and Cartography,
Ivan Franko National University of Lviv
41, Doroshenko str., Lviv, 79007, Ukraine

Pylypovych Olga Vasylivna,
Candidate of Geographical Sciences, Associate Professor,
Associate Professor at the Department
of Constructive Geography and Cartography,
Ivan Franko National University of Lviv
41, Doroshenko str., Lviv, 79007, Ukraine

Bilanyuk Volodymyr Ivanovych,
Candidate of Geographical Sciences, Associate Professor,
Dean of the Faculty of Geography,
Ivan Franko National University of Lviv
41, Doroshenko str., Lviv, 79007, Ukraine

CHAPTER 21

ТЕОРЕТИКО-МЕТОДОЛОГІЧНІ Й ПРИКЛАДНІ АСПЕКТИ ДОСЛІДЖЕННЯ ОЗЕРНОЇ СЕДИМЕНТАЦІЇ В УМОВАХ ПОЛІССЯ УКРАЇНИ

Ільїна О. В., Ільїн Л. В.
DOI https://doi.org/10.30525/978-9934-26-654-6-21

ВСТУП

Озера Українського Полісся є важливими складовими ландшафтів і характеризуються специфічними умовами нагромадження донних відкладів. У межах водозбірного басейну вони є місцем акумуляції органічного й теригенного матеріалу, який надходить з поверхневими й підземними водами. У водоймі відбуваються складні хіміко-біологічні процеси, які визначають сучасний озерний седиментогенез. Озерна водойма з часу утворення є місцем формування й акумуляції різноманітних за складом донних відкладів. Нагромадження озерних відкладів є кінцевим результатом складних процесів перетворення й переміщення речовини та енергії у системі «водозбір – озеро».

Озера регіону як елементи природного середовища тісно пов'язані з фізико-географічними умовами оточуючих ландшафтів. Це проявляється у надходженні до водойм осадового матеріалу, особливості якого визначаються природними умовами і, насамперед, особливостями підстилаючих порід, клімату й рельєфу в межах площ водозборів. Різноманітність водозборів озер – основа відмінностей хімічного складу води й донних відкладів.

Седиментаційно-діагенетичні процеси формування відкладів, їх склад і поширення відображають загальний зміст природних процесів у межах досліджуваного регіону з властивими йому місцевими особливостями. Озеро в межах свого басейну – це базис акумуляції. З часу виникнення воно є місцем нагромадження й формування різнотипних речовин. Їхній склад, швидкість нагромадження, потужність пов'язані з ландшафтними особливостями водозбору й сукупністю явищ, які відбуваються в озері.

В озерних улоговинах нагромаджуються донні відклади, які є важливими компонентами вивчення змін природних явищ і процесів

на водозборах. Вони відображають комплекс глобальних і локальних подій, що контролюють механізм особливостей осадконагромадження й особливості складу його продуктів. Саме тому цікавими об'єктами дослідження озерних систем є донні відклади. Використовуючи сучасні методи дослідження (геохімічні, лімнопалеогеографічні, біологічні) можлива реконструкція умов і процесів седиментогенезу, з'ясування динаміки водно-стокових особливостей, оцінювання впливу кліматичних змін на зональність природи й еволюційну спрямованість змін в голоцені.

В антропогеновому осадовому покриві території разом із відкладами інших генетичних типів широко представлені донні відклади сучасних озерних водойм. В окремих районах озерні басейни седиментації займають до 10 % території. Проте, незважаючи на значне поширення сучасних озерних відкладів, їх вивченню до сьогодні не приділялося значної уваги. Разом із тим, дослідження озерних відкладів має велике прикладне значення, воно пов'язане з пізнанням специфіки озерного седиментогенезу й реконструкцією палеоприродних умов голоцену; воно має і практичну цінність, зумовлену господарським використанням озерних відкладів.

1. Теоретичні аспекти дослідження озерної седиментації

При виконанні дослідження опрацьовано фондові матеріали Державного науково-виробничого підприємства «Геоінформ України». Аналіз озерних відкладів базується на теоретичних і методологічних засадах сучасної лімнології[1, 2, 3], органічної геохімії озерних відкладів[4], аналітичних методах хімічних досліджень озер та їх інтерпретації[5]. Вивчення донних відкладів озер – важливий напрям у геохімії, водній

[1] Argillier C., Carriere A., Poikane S., Van de Bund W. Lake Hydromorphological Assessment and Monitoring Methodologies. European survey, EUR 31029 EN, Publications Office of the European Union. Luxembourg, 2022. DOI: 10.2760/274896, JRC127847.

[2] Cole G. A., Weihe P. E. Textbook of Limnology. 5th ed. Waveland Press. 2016. 440 p.

[3] Oakenfold S. Limnology and Freshwater Ecology. Syrawood Publishing House, 2017. 241 p.

[4] Bertrand S., Tjallingii R., Kylander M., Wilhelm B., Roberts S., et al. Inorganic geochemistry of lake sediments: A review of analytical techniques and guidelines for data interpretation. *Earth-Science Reviews*. 2024. № 249. P. 104639. DOI: 10.1016/j.earscirev.2023.104639.

[5] Frančišković-Bilinski S., Sakan S. Geochemistry of Water and Sediment. *Water*. 2021. № 13 (5). P. 693. DOI: https://doi.org/10.3390/w13050693

токсикології та навіть розглядається як обов'язковий компонент у програмах контролю забруднення природного середовища[6, 7, 8].

Особливості клімату, рельєфу, ґрунтового й рослинного покриву визначають ступінь площинного змиву, внаслідок якого при обмеженні ролі річкового стоку в озера надходять органічні й мінеральні речовини. За певних природних умов в озері розвиваються процеси, які й призводять до нагромадження різноманітних за фаціальним складом товщ озерних відкладів. Процеси осадконагромадження зумовлені не тільки зовнішніми умовами, а й морфологічними особливостями улоговин, гідродинамічним і гідрохімічним режимом водної маси і в кінцевому підсумку – розвитком лімнобіонтів.

Морфометричні особливості озерних улоговин визначають водний режим, головним чином температурну стратифікацію водойм, у результаті якої формується газовий режим і мінералізація, що визначає тип озерних відкладів і вміст у них хімічних елементів. Рельєф озерних улоговин у поєднанні з ґрунтовим покривом регулюють інтенсивність процесів ерозії і вивітрювання на водозборі. Теригенний матеріал із водозбору надходить і розподіляється відповідно до законів механічної диференціації. Осідаючи на дні, він змішується із залишками відмерлих організмів, частково або повністю мінералізованими аутигенними новоутвореннями, які формуються в ході фізико-хімічних та біохімічних процесів. Тут утворюється шар пелогену (напівколоїдної рідкої маси), у якому відбуваються важливі біохімічні процеси, від спрямованості й інтенсивності яких значною мірою залежать найважливіші властивості донних відкладів озер (сапропелів)[9, 10, 11]. Шар відкладів під пелогеном є кінцевою продукцією водойм озерного типу, на властивості якого тією чи іншою мірою впливають різні лімнічні чинники.

---

[6] Fluet-Chouinard E., Messager M. L., Lehner B., Finlayson C. Freshwater Lakes and Reservoirs. In: Finlayson C., Milton G., Prentice R., Davidson N. (eds) *The Wetland Book*. Springer, Dordrecht. 2018. DOI: https://doi.org/10.1007

[7] Hoffman S. Lake sediment geochemistry. In: General Geology. Encyclopedia of Earth Science. Springer, Boston, MA. 1988. DOI: https://doi.org/10.1007/0-387-30844-X_59

[8] Ran F., Nie X., Wang S., Xiao T., Yang C., Liu Y., Wang L., Liu Y., Chu X., Li Z. A significant loop of lake sedimentation state links catchment eco-surroundings and lake biogenic regime shifts. *Limnol Oceanogr*. 2023. № 68. P. 1775–1790. DOI: https://doi.org/10.1002/lno.12385

[9] Ільїн Л. В. Озерні відклади. Екологічна енциклопедія: У 3 т / редкол.: А. В. Толстоухов (гол. ред.) та ін. Київ : ТОВ «Центр екологічної освіти та інформації», 2008. Т. 3: О–Я. С. 17.

[10] Ільїн Л. В. Озерознавство: Укр.-рос. сл. Поняття і терміни. Луцьк : Ред.-вид. відд. «Вежа» Волин. держ. ун-ту ім. Лесі Українки, 2001. 112 с.

[11] Шевчук М. Й. Сапропелі України: запаси, якість та перспективи використання. Луцьк : Надстир'я, 1996. 384 с.

Ландшафтознавчо-геохімічний підхід до реконструкції еволюції озерних екосистем (лімносистем) ґрунтується на відповідності тих чи інших ландшафтно-геохімічних обстановок певним умовам їх існування[12, 13, 14]. Значну інформацію про минуле несуть геохімічні релікти (асоціації хімічних елементів, різні новоутворення тощо), які вміщують дані про геохімічні особливості минулих ландшафтів, відрізняються від сучасних хімічним складом. Велике значення у вивченні еволюції лімносистем має аналіз геохімічних циклів міграції речовини, оскільки вся історія розвитку лімносистем є неперервною диференціацією речовини.

Оскільки функціонування лімносистем нерозривно пов'язане з міграцією речовини, розподіл і різноманітність перетворень продуктів техногенезу в геосистемах визначається існуючою ландшафтно-геохімічною ситуацією [15]. Дослідження динаміки геохімічних параметрів відображає одну зі сторін загальної динаміки лімносистем (спонтанний розвиток) і їх антропогенних похідних модифікацій у стаціонарних умовах, дає змогу прогнозувати ландшафтно-геохімічну ситуацію, яка можлива при трансформації геосистем під впливом техногенезу.

Як відомо, особливості малих озерних басейнів у тому, що осадконагромадження тісно пов'язане зі складом порід водозборів. Диференціація речовини на стадії седиментації сприяє формуванню генетично різних відкладів, поширеність яких підпорядкована регіональним умовам. Для зіставлення басейнів і з'ясування їх регіональних особливостей важливо мати докладну інформацію про середні (кларкові) вмісти основних компонентів породоутворення. Разом із аналітичними даними нами нагромаджено матеріал, який характеризує відклади понад 200 різнотипних водойм Українського Полісся. Деталізовані також дані про типізацію відкладів, що дає можливість проводити систематизацію даних на генетичній основі[16, 17, 18, 19].

---

[12] Малишева Л. Л. Геохімія ландшафтів : навч. посібник. Київ : Либідь, 2000. 472 с.

[13] Ільїн Л. В. Ландшафтно-геохімічні аспекти дослідження лімносистем. *Вісник Львівського університету. Серія географічна*. 2006. Вип. 33. С. 130–136.

[14] Ilyin L. Geochemical peculiarities of bottom sediments in polytypic lakes of Ukrainian Polissya. *Limnological Review*. 2002. № 2. P. 155–163.

[15] Ilyin L. Właściwości geochemiczne osadów dennyh różnych typów jezior Polesia Ukraińskiego. Naturalne i antropogeniczne przeksztalcenia jezior: VI Konferencja limnologiczna. Lublin – Okuninka : Maria Curie-Sklodowska University, 2002. P. 21–22.

[16] Ільїн Л. В. Лімнокомплекси Українського Полісся : монографія : у 2-х т. Т. 1. Природничо-географічні основи дослідження та регіональні закономірності. Луцьк : РВВ «Вежа» ВДУ ім. Лесі Українки, 2008. 316 с.

[17] Ільїн Л. В. Геохімічні особливості донних відкладів озер Полісся України. *Агрохімія і ґрунтознавство: Міжвідомчий тематичний науковий збірник*. Харків-Луцьк, 2002. Кн. 4. С. 89–98.

Різностороннє вивчення озер сприяє використанню їх ресурсів, з'ясуванню антропогенного впливу на водне середовище й донні відклади, створює можливість прогнозувати подальше використання водних об'єктів. Кожне завдання ґрунтується на аналізі складних процесів озерної седиментації, міграції та взаємодії речовин і хімічних елементів у системах «водозбір – озеро, вода – донні відклади». Геохімічний підхід передбачає дослідження закономірностей розподілу осадоутворюючих елементів у різнотипних озерах, які різняться за походженням та природними умовами водозбірів.

Озерні басейни Українського Полісся в силу свого зонального положення, розмірів і походження зручні для дослідження геохімії осадового процесу й органо-мінеральних поєднань. Осадоутворення відбувається тут за різних умов (геолого-геоморфологічних, ландшафтних, фізико-хімічних).

Різноманітними є генезис, морфологія озерних улоговин, їх положення в ландшафтах. Накопичення осадового матеріалу супроводжується формуванням новоутворених акумуляцій, механічних сумішей та (або) однорідних органо-мінеральних й органічних відкладів, розміщення і склад яких відповідає лімнічним і геохімічним властивостям улоговин, змісту автохтонно-аутигенних процесів.

При геохімічному вивченні відкладів озер розрізняють, зазвичай, такі завдання: оцінювання вмісту основних осадоутворюючих елементів, дослідження хімічного складу органічної частини відкладів, вивчення карбонатної речовини як комплексного показника умов і середовища осадонакопичення, оцінювання вмісту мікроелементів як показників антропогенного забруднення, вивчення форм знаходження елементів як індикатора фазового стану осадового матеріалу[20].

Склад речовини, яка утворює озерні відклади, характеризується вмістом головних осадоутворюючих складників – SiO_2, Al_2O_3, CaO, MgO, Fe_2O_3, Na_2O, K_2O, зольністю.

---

[18] Ільїн Л. В., Ільїна О. В. Вплив техногенезу на седиментаційні процеси в озерах Українського Полісся. *Екологічні аспекти регіонального партнерства в надзвичайних ситуаціях* : збірник матеріалів І Міжвузівської науково-методичної конференції (Харків, 21 листопада 2012 р.). Харків : НУЦЗУ, 2012. С. 43–45.

[19] Pasichnyk M. P., Ilyin L. V., Ilyina O. V. Composition and Properties of Bottom Sediments of the Shatsk Lakes (West Polesia of Ukraine). *17th International Conference Monitoring of Geological Processes and Ecological Condition of the Environment*. Nov 2023. Vol. 2023. P. 1–5. DOI: https://doi.org/10.3997/2214-4609.2023520145

[20] Ільїн Л. В. Лімнокомплекси Українського Полісся. У 2-х т. Т. 2: Регіональні особливості та оптимізація. Луцьк : РВВ «Вежа» Волин. нац. ун-ту ім. Лесі Українки, 2008. 400 с.

Індикаторами умов і чинників осадонакопичення можуть бути: у карбонатних відкладах – загальний вміст і варіації в розрізах органічних речовин, карбонатів і їх складу, теригенних компонентів (кремнезему, алюмінію, лугів), мікроелементів (титану, хрому, ванадію, цирконію, марганецю, міді; в озерах-органонагромаджувачах з одноманітними осадовими товщами – розподіл за площею і динаміка в розрізах органічної речовини, pH-, Eh- показників, кислотно розчинного заліза й ін.; у відкладах із чергуванням мінеральних й органічних відкладів додаткову інформацію несуть варіації форм сірки, заліза, мікроелементів.

Процес акумуляції речовини в озерах відбувається за участю внутрішньоводоймних (лімнічних) і зовнішніх процесів. За уповільненого водообміну в різних природних умовах водозборів формуються різні типи осадконагромадження. Оскільки донні відклади (сапропелі) є складними природними утвореннями, а їх склад змінюється в значних межах і залежить від багатьох чинників, застосування методів математичної статистики забезпечує достатньою точність у з'ясуванні їх об'єктивних характеристик.

Вичення особливостей нагромадження відкладів озер із урахуванням максимального числа суто лімнічних, породоутворюючих та інших природних чинників дає можливість установити закономірності формування їх складу і властивостей у різнотипних водоймах.

Ландшафтознавчо-геохімічний аналіз лімносистем, які функціонують в умовах техногенезу, є важливою ланкою у вивченні розвитку геосистем та їх похідних антропогенних модифікацій для організації раціонального природокористування.

За даними загального вмісту компонентів можна простежити зміни у складі як за площею, так і розрізом озерних відкладів, здійснити оцінювання сапропелевих та інших корисних копалин, визначити шляхи їх практичного використання.

2. Мінеральна складова донних відкладів

Величина і склад мінеральних компонентів визначаються у загальному вигляді показником зольності. Він залежить від надходження речовини в озеро з річковим, ґрунтовим і поверхневим стоком, хімічним складом води й від комплексу фізико-хімічних та біохімічних процесів, які відбуваються в самій водоймі. Мінеральні речовини, які входять до складу озерних сапропелів, включають принесені кластогенні елементи, аутигенні утворення, компоненти, адсорбційно пов'язані з органічною речовиною або металоорганічні сполуки.

Зольність – головний визначальний показник якісної характеристики відкладів водойм, а, відповідно, і напрямів їх використання. Зовсім недавно деякі вчені вважали, що оцінку сапропелів слід проводити винятково за їх золою. У зв'язку з нагромадженням значних матеріалів із генезису озерних відкладів (виявлено сапропелі, які вміщують 80–90 % органічних речовин), природно, що оцінка їх повинна бути ґрунтовніша, з урахуванням можливості використання органічної частини.

Загальний розподіл зольності за вертикалю у відкладах можна представити двома схемами, характерними для сучасних органогенних відкладів: у нижніх горизонтах сапропелевих відкладів уміст золи вищий, а до верхніх горизонтів зменшується; на стратиграфічних розрізах ряду родовищ уміст золи в сапропелях знизу догори однаковий або дуже близький.

Розглядаючи зольність сапропелів, доцільно зупинитися на хімічному складі їх золи. Це питання розглядалося рядом дослідників для Українського Полісся[21, 22].

Кількість мінеральної частини, її склад, форми окремих мінералів мають вирішальне значення в типовій і видовій характеристиці того чи іншого покладу, а також визначають його господарського використання. У наших дослідженнях на основі фондових матеріалів Державного науково-виробничого підприємства «Геоінформ України» вивчено склад золи й окремі форми елементів, що важливо для подальшого використання відкладів у різних галузях економіки (табл. 1).

Аналіз фондових матеріалів Державного науково-виробничого підприємства «Геоінформ України» засвідчує, що зольність має тенденції до зміни з глибиною відкладів. Цей показник варіює від 18 % (7,0–7,5 м – оз. Велике II) до 81,2 (4,0–4,5 м – оз. Красне).

У сапропелях різних типів уміст мінеральної частини коливається в таких межах: в органічних – 7–30 %, змішаних – 32–56, кремнеземистих і карбонатних – 40–85 % в розрахунку на суху речовину.

Основу мінеральної частини донних відкладів в умовах досліджуваної території становлять сполуки кремнію – 71,87 % (оз. Пулемецьке), 56,41 % (оз. Люцимир), SiO_2 на суху речовину (табл. 2). У відкладах кремній перебуває у вільній формі (кварц) у складі силікатних і алюмосилікатних мінералів, а також у вигляді аморфної кремнекислоти.

---

[21] Ільїн Л. В., Мольчак Я. О. Озера Волині. Лімнолого-географічна характеристика. Луцьк : Надстир'я, 2000. 140 с.

[22] Довідник ресурсів сапропелю України. Кн. 1. Волинська область. Київ : ДГП «Північукргеологія», 1994. 194 с.

Таблиця 1

Вертикальний розподіл зольності у донних відкладах різнотипних озер Українського Полісся, %

Глибина, м	Озера										
	Мошне (Волинська область)	Велике II (Рівненська область)	Мале (Рівненська область)	Оструватське (Рівненська область)	Оріхове (Рівненська область)	Осовицьке (Рівненська область)	Ухове (Волинська область)	Луко (Рівненська область)	Волово (Київська область)	Красне (Сумська область)	Сядрино (Сумська область)
0,0–0,5	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–
0,5–1,0	–	–	–	–	–	–	–	–	38,25	–	31,9
1,0–1,5	–	–	–	–	–	–	–	–	39,79	–	31,6
1,5–2,0	37,0	50,0	42,0	42,0	23,0	–	–	–	39,29	–	39,6
2,0–2,5	37,0	29,0	34,7	46,0	30,0	–	–	33,0	42,14	–	45,4
2,5–3,0	27,0	29,0	32,7	47,0	32,0	45,5	–	37,9	41,43	–	52,6
3,0–3,5	25,0	29,0	37,0	42,5	36,0	46,1	–	39,1	38,07	–	57,8
3,5–4,0	25,0	24,0	32,0	39,5	36,0	48,2	–	44,6	37,14	–	59,3
4,0–4,5	24,0	25,5	31,5	39,5	35,0	46,6	–	40,2	38,50	81,2	–
4,5–5,0	26,0	25,0	33,5	37,5	30,0	43,5	48,0	40,8	39,00	70,8	–
5,0–5,5	26,0	34,0	32,5	41,0	36,0	44,5	38,0	44,1	41,92	65,8	–
5,5–6,0	24,0	33,5	32,5	36,0	35,0	41,2	44,0	43,9	40,50	69,0	–
6,0–6,5	25,0	38,5	32,5	39,0	25,0	48,7	42,0	44,8	42,50	65,7	–
6,5–7,0	24,0	30,0	33,0	38,0	33,5	46,6	43,0	42,3	38,13	61,5	–
7,0–7,5	28,0	18,0	32,0	39,0	32,0	45,3	42,0	37,8	38,00	57,3	–
7,5–8,0	24,0	24,5	34,0	39,0	33,0	47,5	37,0	47,8	40,00	50,8	–
8,0–8,5	34,0	26,0	36,5	40,5	49,5	42,5	35,0	42,8	40,50	63,7	–
8,5–9,0	31,0	27,0	36,5	40,5	46,5	44,6	40,0	39,5	42,67	48,7	–
9,0–9,5	28,0	33,0	36,5	39,0	40,0	51,0	39,0	33,7	41,67	52,0	–
9,5–10,0	28,0	35,0	35,0	37,0	29,0	54,0	39,0	38,2	46,67	48,5	–
10,0–10,5	27,0	39,0	33,5	35,0	22,0	46,0	34,0	42,0	45,83	54,0	–
10,5–11,0	30,0	30,0	34,0	34,0	32,0	54,0	36,0	41,7	42,00	58,0	–
11,0–11,5	52,5	20,0	43,5	37,0	43,0	53,0	32,0	41,7	43,50	–	–
11,5–12,0	–	28,0	40,0	42,5	33,0	–	40,0	45,0	42,00	–	–
12,0–12,5	–	28,0	43,0	32,0	37,0	–	37,0	37,0	51,50	–	–
12.5–13,0	–	32,0	44,0	–	26,0	–	36,0	–	51,50	–	–
13,0–13,5	–	35,0	38,0	–	25,0	–	33,0	–	54,00	–	–
13,5–14,0	–	35,0	–	–	32,0	–	23,5	–	53,00	–	–
14,0–14,5	–	22,0	–	–	–	–	50,0	–	53,50	–	–
14,5–15,0	–	–	–	–	–	–	54,0	–	48,50	–	–
15,0–15,5	–	–	–	–	–	–			46,50	–	–

Джерело: узагальненно за фондовими матеріалами Державного науково-виробничого підприємства «Геоінформ України»

Таблиця 2

Хімічний склад поверхневих донних відкладів різнотипних озер, % на абсолютно суху речовину

Назва озера	Місце відбору, глибина, м	SiO_2	Al_2O_3	Fe_2O_3	MnO	CaO	MgO	SO_3	P_2O_5	Зольність	$C_{орг.}$	Донні відкдади
Світязь	15,4	36,55	5,76	1,98	0,10	16,47	0,81	0,56	0,26	65,31	12,40	Сапропель кремнеземистий
Світязь	30,4	6,83	2,52	2,15	0,21	19,47	1,52	1,76	0,83	34,65	26,98	Сапропель тонкодетритовий
Пулемецьке	8,0	49,44	3,13	2,70	0,13	3,74	0,02	2,26	0,37	64,63	15,92	Сапропель кремнеземистий
Пулемецьке	7,2	71,87	4,01	2,28	0,12	1,64	0,59	0,26	0,30	81,65	9,27	Мул глинистий
Пулемецьке	12,0	27,22	4,96	6,94	0,01	2,86	0,75	1,53	0,55	48,20	27,62	Сапропель тонкодетритовий
Люцимир	9,0	56,41	6,47	9,19	0,76	2,75	0,21	0,51	2,79	78,75	11,43	Мул глинистий озалізнений
Люцимир	6,0	36,83	0,33	5,35	0,12	2,28	0,87	2,87	0,46	54,81	21,64	Сапропель кремнеземистий
Чорне Велике	1,5	14,31	3,09	1,33	0,37	18,45	0,95	0,74	0,31	44,60	22,39	Сапропель тонкодетритовий
Соминець	2,5	1,65	1,35	0,89	0,09	26,67	0,73	–	0,21	35,36	23,72	Сапропель тонкодетритовий
Карасинець	1,5	11,06	4,13	2,15	0,06	4,88	0,43	0,26	0,29	28,66	34,60	Сапропель тонкодетритовий
Озерце	2,0	12,34	3,04	1,77	0,08	7,89	–	1,36	0,47	35,39	32,50	Сапропель тонкодетритовий
Чорне Мале	1,0	11,86	4,30	3,60	0,04	7,95	1,26	3,43	0,70	36,43	29,47	Сапропель тонкодетритовий
Климівське	1,5	23,05	2,48	2,78	0,09	6,14	1,25	2,81	0,42	45,01	25,68	Сапропель тонкодетритовий

Джерело: узагальненно за фондовими матеріалами Державного науково-виробничого підприємства «Геоінформ України»

Інтенсивність нагромадження кремнію і алюмінію в озерних відкладах залежить від надходження теригенного матеріалу, що зумовлено інтенсивністю ерозійних процесів, рельєфом і поверхневими відкладами водозборів. Нагромадження кристалічного кремнію і алюмінію повністю визначається обсягами теригенного стоку продуктів руйнування четвертинних покривних відкладів і диференціюється відповідно до законів механічної седиментації. Максимальна акумуляція алюмінію відбувається в евтрофних і мезотрофних озерах у тонкодисперсних відкладах із великим умістом глинистого матеріалу.

Крім показника зольності, основними компонентами донних відкладів змішаного типу, як зазначалося вище, є SiO_2,CaO, MgO, Fe_2O_5, Al_2O_3, MnO, P_2O_5, N_2O, K_2O й ін.

Близько 30 % представлено відкладами, зола яких складається з кристалічної SiO_2, а вміст окремих компонентів, включаючи P_2O_5 (0,12–1,4 %) і K_2O (0,3–1,3 %), ідентичні сапропелям органічного типу. Ці сапропелі характеризуються більш високим рівнем зольності (в середньому 35 %), ніж органічні. Вміст SiO_2 в золі коливається 8,1–27,8 %, CaO від 7,9–17,3 %, Fe_2O_5 – 5,9–19,1 % у розрахунку на суху речовину.

Для кремнеземистих сапропелів показник умісту SiO_2 сягає від 29,7 до 74,6 %. Для кремнеземистих відкладів характерний найбільший уміст Fe_2O_5 (6,4–13,2 %), що зумовлено наявністю глинистих мінералів. Зазвичай, підвищеному вмісту алюмінію відповідає підвищений уміст калію. Так, уміст Al_2O_3 становить 6,3–12,7 %, уміст K_2O дорівнює 1,2–3,6 %.

Для карбонатних відкладів головний мінеральний компонент – карбонат кальцію (від 29,8 до 84,2 %). Уміст SiO_2 і Fe_2O_5, які переважають серед інших компонентів золи, зменшується в міру зростання $CaCO_3$. Карбонатні сапропелі бідні окислами фосфору (0,09–0,56 %) і калію (0,12–0,48 %).

Відклади всіх типів бідні сіркою. Її кількісний уміст не переважає 3 %, складаючи в середньому 0,09–1,7 %.

Показники кислотності в сапропелевих відкладах не мають значних відхилень і коливаються від кислотного (3,2, оз. Тухове*)* до слабокислотного (8,48, оз. Осовитське). Як засвідчують дані щодо водойм, розміщених у різних регіонах Українського Полісся, більшість озерних відкладів має показник pH від 5,5 до 7,5.

Дослідження вологості засвідчують, що нижні придонні горизонти мають дещо нижчу вологість, яка до верхніх горизонтів збільшується (табл. 3).

Таблиця 3

Вертикальний розподіл вологості донних відкладів різнотипних озер Українського Полісся, %

Глибина, м	Озера										
	Мошне (Волинська область)	Велике II (Рівненська область)	Мале (Рівненська область)	Оструватське (Рівненська область)	Оріхове (Рівненська область)	Осовицьке (Рівненська область)	Ухове (Волинська область)	Луко (Рівненська область)	Волово (Київська область)	Красне (Сумська область)	Сядрино (Сумська область)
0,0–0,5	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–
0,5–1,0	–	–	–	–	–	–	–	–	94,42	–	92,88
1,0–1,5	–	–	–	–	–	–	–	–	94,18	–	91,79
1,5–2,0	94,37	86,83	89,22	93,81	95,26	–	–	–	93,60	–	88,23
2,0–2,5	94,41	92,57	91,74	92,55	93,84	–	–	93,25	93,03	–	77,85
2,5–3,0	95,18	92,44	93,05	92,50	92,27	86,44	–	92,63	91,48	–	68,65
3,0–3,5	94,40	92,42	93,26	92,90	92,67	86,80	–	92,62	91,93	–	62,32
3,5–4,0	94,00	93,13	92,80	93,03	92,26	83,76	–	92,29	91,35	–	62,12
4,0–4,5	94,51	92,30	94,10	93,14	90,91	83,05	–	92,41	92,24	78,80	–
4,5–5,0	94,00	93,01	93,56	92,51	91,66	86,88	83,21	92,84	90,62	80,28	–
5,0–5,5	92,84	91,36	93,14	92,66	91,77	85,39	89,86	91,91	89,47	79,27	–
5,5–6,0	94,69	91,28	92,19	91,78	92,07	86,53	86,07	91,83	90,07	76,24	–
6,0–6,5	94,16	91,07	91,9	92,08	91,70	81,94	86,44	91,34	89,35	81,83	–
6,5–7,0	94,22	91,26	92,84	91,18	91,20	82,20	88,31	91,60	90,22	82,33	–
7,0–7,5	93,03	93,27	92,99	91,18	92,06	81,94	84,87	91,26	89,05	86,05	–
7,5–8,0	93,78	93,91	92,74	91,33	89,66	82,21	86,24	90,90	90,46	87,92	–
8,0–8,5	93,18	92,92	93,12	91,66	87,82	83,92	90,62	91,55	88,54	83,78	–
8,5–9,0	92,88	93,00	92,22	90,77	87,56	84,64	83,23	91,12	88,04	87,38	–
9,0–9,5	93,46	91,25	91,40	90,77	89,33	83,82	85,76	91,15	87,75	87,20	–
9,5–10,0	94,94	89,91	91,65	90,67	89,59	81,17	85,07	90,83	86,20	87,75	–
10,0–10,5	93,74	90,37	90,03	90,96	91,15	86,80	87,39	89,60	85,77	85,04	–
10,5–11,0	93,29	90,70	91,32	90,86	90,35	75,68	84,51	89,97	84,94	84,00	–
11,0–11,5	87,86	93,79	91,28	90,52	90,75	80,74	87,86	89,57	79,36	–	–
11,5–12,0	–	95,38	88,92	88,88	89,02	–	81,27	89,34	83,86	–	–
12,0–12,5	–	94,33	89,59	–	90,61	–	83,65	89,82	82,85	–	–
12,5–13,0	–	93,18	88,35	–	89,71	–	86,27	–	80,07	–	–
13,0–13,5	–	91,15	88,99	–	90,16	–	85,39	–	79,68	–	–
13,5–14,0	–	90,28	88,99	–	90,69	–	91,03	–	79,61	–	–
14,0–14,5	–	88,26	–	–	–	–	89,17	–	78,72	–	–
14,5–15,0	–	92,47	–	–	–	–	81,26	–	81,00	–	–
15,0–15,5	–	–	–	–	–	–	–	–	78,94	–	–

Джерело: узагальненно за фондовими матеріалами Державного науково-виробничого підприємства «Геоінформ України»

Специфіку якісного складу донних відкладів Українського Полісся визначають геохімічні відмінності ландшафтів. Сапропелі озер характеризуються невисокою зольністю, що пов'язано зі значною заболоченістю низинних водозборів. Ці чинники, а також склад покривних порід призводять до помітної дистрофікації озер, що сприяє підвищеній концентрації оксидів заліза в сапропелях. Оксиди кальцію, навпаки, більше концентруються в сапропелях підвищених ландшафтів, які мають супіщані й, рідше, суглинисті поверхневі породи.

Механізм озерного нагромадження визначає речовинну своєрідність відкладів, склад і стратиграфію донних відкладів, їх зв'язок із ландшафтними особливостями регіону, загальними лімнічними умовами водойм і змінами цих умов протягом усього часу існування озер.

У процесах озерного нагромадження відкладів відображається різноманітність ландшафтно-геохімічних особливостей водозборів і фізико-хімічного середовища водойм. Механічна, хімічна та біотична диференціація речовини тісно пов'язана і проявляється у специфіці геохімії окремих елементів.

3. Біогенні елементи донних відкладів

Оскільки озера є нагромаджувачами і трансформаторами речовини в літосфері й відображають в інтегрованому вигляді стан і динаміку басейнової геосистеми, то актуальними є питання виявлення показників зміни стану озерних геосистем: їх стаціонарних режимів, динаміки, напрямків можливих змін. У цьому плані найбільш інформативним компонентом озерної геосистеми є донні відклади – кінцевий результат складних процесів перетворення речовин, що відбуваються в часі в межах водозбору.

Одним із найчутливіших індикаторів цих природних процесів є вміст біогенних елементів у донних відкладах. У цьому аспекті донні відклади вивчені недостатньо, чим пояснюється відсутність геохімічних критеріїв, що дають можливість простежити ті чи інші сторони озерного нагромадження відкладів. Виявлення геохімічних індикаторів умов озерного нагромадження необхідне для раціонального вирішення проблем моніторингу озерних геосистем, оскільки використання для цієї мети донних відкладів виключає потребу тривалого спостереження для отримання необхідної інформації.

Антропогенні зміни біогенного навантаження тим чи іншим чином відображаються на зміні структури екосистеми озер: зростає рівень біопродуктивності, змінюється видовий склад біотичних угруповань, порушується стійкість трофічних зв'язків. Однак питання про

трансформацію біогенних елементів у водоймі, про їх вплив на рівень і швидкість евтрофікації озер і сьогодні є актуальним і поки що далеким від вирішення.

До біогенних елементів належать: залізо (Fe), сірка (S), азот (N), калій (K), фосфор (P) та їхні сполуки. Залізо – один із найбільш динамічних компонентів донних відкладів, його седиментація тісно пов'язана з фізико-хімічними умовами і трофністю озерних водойм. Завдяки здатності утворювати окисні й закисні форми залізо, чітко реагує на зміни в окисно-відновних умовах водної маси.

В озерах зі стійким відновним середовищем нанопичення заліза відбувається за рахунок органічних та мінеральних комплексних сполук. Іонні сполуки заліза швидко гідролізуються, окислюються і випадають в осад. Стабілізації заліза в донних відкладах при цьому сприяє глинистий фон седиментації, оскільки основна частина теригенного заліза пов'язана з глинистими мінералами.

Високий уміст органічної речовини визначає можливість утворення в донних відкладах комплексних сполук заліза. Зі зменшенням впливу органічних речовин роль фізико-хімічних процесів у накопиченні заліза зростає.

У донних відкладах розглянутих озер міститься значна кількість Fe_2O_3, яка коливається у значних межах: від 0,72 % (оз. Велике II, 7,5–8,0 м), до 18,0 % (оз. Мале 12,5–13,0 м). Найпоширенішою в донних відкладах є сполука заліза – лімоніт. Вертикальний розподіл біогенів у відкладах узагальнений у табл. 4, а середні показники вмісту його у різнотипних озерах – у табл. 5.

При підвищеному вмісті заліза часто спостерігається підвищений вміст фосфору, який варіює в широких межах від 0,05 % до 7,41 %, залежно від виду донних відкладів. В озера фосфор потрапляє у вигляді домішок органічної речовини, де згодом адсорбується, випадає в осад і мінералізується бактеріями.

У донних відкладах присутні органічні й неорганічні сполуки фосфору (сполуки з алюмінієм, кальцієм, залізом). Неорганічні форми фосфору переважають в евтрофних озерах, що спричинено їх швидкою мінералізацією. Органічні форми фосфору нагромаджуються в донних відкладах дистрофних озер, де вони пов'язані з гуміновими кислотами; характеризуються низькими темпами мінералізації, у результаті чого значна частина фосфору не бере участі в біотичному кругообігові, а відкладається в осад.

Таблиця 4

Біогенні елементи донних відкладів озер Українського Полісся, % на суху речовину[23]

Глибина, м	Оз. Велике II					Оз. Мале					Оз. Оріхове				
	$N_{заг}$	P_2O_5	Fe_2O_3	K_2O	S	$N_{заг}$	P_2O_5	Fe_2O_3	K_2O	S	$N_{заг}$	P_2O_5	Fe_2O_3	K_2O	S
2,0	1,98	0,16	1,04	1,04	1,28	2,88	0,42	1,65	0,30	1,49	3,41	0,32	3,11	0,13	1,19
2,0–2,5	1,80	0,09	0,89	0,89	1,23	–	0,25	2,64	0,21	–	3,05	0,70	3,24	0,18	1,22
2,5–3,0	3,18	0,20	0,95	0,95	1,72	3,29	0,40	1,75	0,25	1,47	3,43	0,22	2,77	0,15	1,24
3,0–3,5	2,31	0,15	0,96	0,96	1,25	–	0,71	2,01	0,17	–	2,55	1,05	4,78	0,24	1,75
3,5–4,0	3,38	0,15	0,95	0,95	1,39	3,02	0,38	2,69	0,18	1,29	2,87	1,05	3,60	0,18	2,33
4,0–4,5	3,17	0,11	0,87	0,87	1,18	–	0,84	1,54	0,24	–	3,01	0,86	4,93	0,23	1,50
4,5–5,0	3,80	0,15	0,91	0,91	1,24	2,66	0,19	1,76	0,25	1,35	3,35	1,60	4,34	0,17	1,72
5,0–5,5	2,45	0,05	0,75	0,75	1,07	–	1,47	4,22	0,13	–	3,13	1,53	6,21	0,24	1,60
5,5–6,0	4,00	0,08	1,14	1,14	1,04	3,34	0,31	3,12	0,12	1,49	3,05	1,01	5,70	0,25	1,62
6,0–6,5	2,89	0,08	1,15	1,15	1,62	–	0,71	3,22	0,12	–	2,94	1,16	4,97	0,27	1,89
6,5–7,0	3,37	0,11	1,05	1,05	1,09	3,26	0,51	2,49	0,12	1,53	2,95	5,03	4,35	0,25	1,39
7,0–7,5	3,80	0,11	0,85	0,85	1,44	–	2,94	4,56	0,12	–	3,17	1,23	4,50	0,23	1,77
7,5–8,0	3,97	0,10	0,72	0,72	1,10	3,14	0,75	3,24	0,18	1,32	3,54	0,67	4,43	0,33	2,03
8,0–8,5	3,62	0,10	0,80	0,80	1,40	–	2,22	4,69	0,09	–	2,45	1,80	4,14	0,47	2,22
8,5–9,0	3,10	0,10	0,84	0,84	1,22	3,11	1,04	5,27	0,14	1,54	2,45	0,23	3,97	0,61	2,29
9,0–9,5	3,80	0,09	0,90	0,90	1,41	–	2,26	3,32	0,16	–	2,29	0,64	2,86	0,17	1,71
9,5–10,0	2,50	0,11	1,22	1,22	1,52	3,24	1,16	3,78	0,16	1,64	–	–	5,99	0,16	–
10,0–10,5	3,80	0,08	1,50	1,50	1,41	–	3,30	4,78	0,15	–	2,81	0,94	5,89	0,15	1,64
10,5–11,0	1,93	0,13	1,99	1,99	1,80	2,72	0,91	5,61	0,15	1,87	–	–	6,79	0,16	–
11,0–11,5	4,46	0,06	1,57	1,57	1,52	–	2,93	6,71	0,16	–	2,92	1,82	7,15	0,26	1,37
11,5–12,0	–	–	0,87	0,87	–	2,81	0,78	6,39	0,17	1,60	–	–	6,82	0,17	–
12,0–12,5	3,45	0,06	0,87	0,87	1,65	–	7,41	10,69	0,12	–	3,05	0,99	6,65	0,20	1,95
12,5–13,0	–	–	0,88	0,88	2,00	3,00	–	18,00	0,08	1,97	–	–	5,60	0,14	–
13,0–13,5	3,02	0,10	1,10	1,10	1,62	–	5,02	16,52	0,09	–	3,30	1,90	5,44	0,10	2,16
13,5–14,0	–	–	1,49	1,49	–	–	–	10,62	0,13	–	–	–	4,92	0,26	–
14,0–14,5	1,99	0,15	2,56	2,56	1,82	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–
14,5–15,0	–	–	1,49	1,49	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–

Слід зазначити підвищену кількість фосфору, що спостерігається в сучасних шарах сапропелів озер. Це пояснюється надмірним антропогенним впливом, що зумовлений господарською діяльністю людини. Основними джерелами надходження фосфору є: комунальні та промислові стоки, тваринницькі ферми, сільськогосподарської підприємства, рекреація і деякі інші. Максимальні надходження фосфору із

[23] Ilyina O. V., Ilyin L. V. Biogenic Elements of Lake Sediments as Indicators of Natural and Anthropogenic Processes. *Monitoring of Geological Processes and Ecological Condition of the Environment* : 18th International Conference. April 2025. Vol. 2025. P. 1–5. DOI: https://doi.org/10.3997/2214-4609.2025510123

тваринницьких ферм і ті, що надходять із комунальними стоками, на окремих озерах становлять до 90 % загального навантаження фосфором. У критичній ситуації перебувають озера, розміщені в межах населених пунктів із багатьма джерелами забруднення, виокремлення яких не завжди можливе. Рекреація, разом із іншими об'єктами, набуває статусу потужного джерела фосфору, рекреаційне навантаження на окремі водойми становить до 50 % від сумарного їх надходження. Вміст фосфору в донних відкладах змінюється досить істотно.

У сапропелях розглянутих озер міститься, зазвичай, незначна кількість сірки – 1–1,8 % і лише в окремих випадках перевищує 2 %. Надходження сірки в донні відклади залежить від особливостей водозбору й окисно-відновних умов озера. Основними формами сірки в сапропелях є органічна, сульфатна й сульфідна. Нагромадження її відбувається внаслідок поглинання сульфат-іонів планктоном. Згодом, у ході мінералізації органічної речовини, сірка переходить у мінеральні форми.

Донні відклади досліджених озер мають високий вміст загального азоту – до 4,5 %. При цьому азот у відкладах головним чином органічного походження. Хімічний склад азотистих утворень зумовлений видами сполук азоту (білки, цукор), що потрапляють у відклади з рештками рослинних і тваринних організмів, які й формують органічну речовину та впливають на сукупність фізико-хімічних та мікробіотичних перетворень у сапропелеутворенні.

Надходження калію та його сполук у озера, а також його седиментація в озених відкладах визначається обсягами теригенного матеріалу, що вноситься. Калій входить до складу алюмосилікатних глинистих мінералів і зв'язаний із тонкодисперсною фракцією відкладів. Він знаходиться у слюдах, польових шпатах, глинистих мінералах, а також у складі деяких важких мінералів. Наявність калію в донних відкладах озер Українського Полісся є не досить значною, становить менше 1 %.

Різнотипні водойми мають різні показники вмісту K_2O (від 0,13 %, оз. Бухове, до 0,80 %, оз. Озеро), P_2O_5 (від 0,13 %, оз. Більське, до 1,45 %, оз. Омит), S (від 1,05 %, оз. Верхнє, до 1,47 %, оз. Вежиця), Fe_2O_3 (від 1,42 %, оз. Озеро, до 7,41 %, оз. Омит) (табл. 5).

Вплив природних й антропогенних процесів на озерні комплекси фіксується сучасними донними відкладами. Дослідження закономірностей просторово-часового розподілу біогенних елементів дає можливість з'ясувати зміни екосистем водойм, пов'язаних із природними чинниками і з діяльністю людини. Зміни умов седиментації біогенів спостерігається також у динаміці варіації їхніх змін у розрізах донних відкладів. Наявність в озерах біогенних елементів робить донні відклади важливим сировинним

ресурсом, який може використовуватися в різних сферах господарської діяльності (сільське господарство, медицина, бальнеологія й ін.).

Таблиця 5

Середні показники вмісту біогенних елементів у різнотипних озерах Українського Полісся, % на суху речовину

Назва озера	K_2O	P_2O_5	S	Fe_2O_3
Більське	0,39	0,13	1,25	1,68
Вежиця	0,22	1,23	1,47	4,04
Бухове	0,13	0,47	1,32	4,96
Омит	0,41	1,45	1,46	7,41
Сосно	0,54	0,72	1,27	4,13
Верхнє	0,52	0,40	1,05	6,13
Миляч	0,33	1,09	1,30	6,32
Озерське	0,42	0,34	1,13	3,85
Сомине	0,28	0,83	1,41	6,20
Карасин	0,18	0,33	1,24	3,95
Мар'янівське	0,28	0,45	1,14	4,25
Озеро	0,80	0,25	1,45	1,42

Наступним етапом аналізу біогенів є виявлення меж, на рівні яких спостерігаються антропогенні зміни й перехід озер в іншу за рівнем трофності стадію розвитку. Знання процесів формування складу відкладів і чинників, які його контролюють, необхідне для науково обґрунтованого прогнозу розвитку водойм, впливу на них техногенного навантаження і розробки схем раціонального використання їхніх ресурсів.

4. Поширення і типізація лімногеохімічних осадових комплексів та можливості їх господарського використання

До числа комплексних характеристик довкілля і його змін належать ландшафтно-геохімічні особливості, які визначають закономірності диференціації речовини й можливості її міграції. Аналіз міграції речовини набуває особливого значення в змінених господарською діяльністю озерних екосистемах, де активно взаємодіє її природний і антропогенний складники[24].

Озерні відклади – дуже складні об'єкти дослідження, їх склад й властивості залежать від різного якісного та кількісного поєднання

[24] Ilyina O., Ilyin L. Forms of Lake Basins of the Ukrainian Polissya Region and Their Transformations in the Process of Accumulation of Bottom Deposits. *GeoTerrace-2023* : International Conference of Young Professionals. Oct 2023. Vol. 2023. P. 1–5. DOI: https://doi.org/10.3997/2214-4609.2023510066

речовин. У зв'язку з цим не випадково в геохімії донних відкладів до цього часу існує [багато невирішених проблем, що стосується насамперед методичних рекомендацій, які регламентували б умови виконання окремих стадій досліджень і дали б можливість взаємодоповнювати результати, отримані в різних наукових установах. Ураховуючи загальні закони розвитку природних комплексів, можна виділити дві групи чинників, що впливають на процес формування і накопичення донних відкладів озер. Це зональні чинники – клімат, ґрунтовий покрив, рослинність; та азональні, які передусім пов'язані з особливостями надр і рельєфу території.

Вивчення седиментації у внутрішньоконтинентальних водоймах дає змогу виявити (з'ясувати) досить складні особливості озерного седиметогенезу, дослідження яких поки ще пов'язане з великими труднощами. Надійному вивченню своєрідного осадонагромадження сприяє значна активність седиментаційних процесів, що протікають в аквальних утвореннях незначного розміру та глибини. Розглядаючи їх як єдину природну систему, можна виявити просторово-часові зміни балансу речовини з усією структурою літоморфодинамічних процесів, вітрохвильовим та водними й гідрохімічним режимами.

Вивчаючи просторово-часові особливості озерного осадконагромадження, ми прагнули не тільки розглянути увесь комплекс процесів нагромадження уламкового матеріалу в озерах – завершальних (кінцевих) водоймах стоку. Не менш важливо виділити основні процеси і явища, які відображаються у стратиграфічному розрізі осадової товщі. Отже, завдання зводилося до виявлення ефемерних утворень і того комплексу явищ, які визначають просторовий розподіл літологічних типів донних відкладів, потужність та будову відкладів.

Із усієї різноманітності типологічних ознак озер їхня основна властивість – нагромадження речовини – є кінцевим вираженням змісту озерних процесів у певних фаціальних умовах. Як відомо, озерне нагромадження – загальний типологічний показник, який застосовують до природних водойм, незалежно від їх характеристик (особливостей).

На основі сутності озерного кругообігу, процес осадонагромадження здійснюється під впливом комплексу внутрішньо- і позаводоймних чинників. Безстічні озера Українського Полісся, розміщені серед рівнинних ландшафтів, розвиваються головним чином під дією внутрішніх процесів. Для таких озер характерний акумулятивний тип водообміну, за якого повна зміна води у водоймі умовно відбувається за роки (наприклад, в оз. Світязь через 9 років), водні маси на 80 % стабільні й характеризуються вираженою термічною стратифікацією, ступінь прояву якої залежить від глибини улоговини. Домінує органічний тип осадонагромадження (органічна речовина становить понад 70 %).

В озерах інших типів процеси кругообігу речовини відбуваються під впливом, головним чином, зовнішніх (алохтонних) або «теригенних» чинників. Вони характеризуються доброю проточністю, що сприяє високій трансформованості водних мас (> 80 %), акумулятивно-транзитному типу водообміну з періодом повної заміни води протягом року, гідрологічного сезону або частіше. У таких озерах відсутня термічна стратифікація, донні відклади представлені мінеральними й гумусними мулами з умістом органічної речовини до 30 %.

У проміжну групу, третю, зі змішаним типом лімногенезу, входять слабопроточні озера, у яких формуються органо-силікатні, змішані й карбонатні відклади з умістом органічної речовини 30–70 %. В озерах переважають транзитно-акумулятивний або акумулятивний тип водообміну, умовна зміна водної маси здійснюється протягом року або повільніше. Трансформовані й основні водні маси складають близько 50 %, у профундальній зоні часто спостерігається дво- або тришарова стратифікація води.

Фактичний матеріал щодо хімічного складу відкладів понад 200 озер дає можливість достовірно проводити типізацію і класифікацію сучасного та голоценового осадонагромадження, районувати територію за типами седиментогенезу. Аналіз отриманих матеріалів засвідчує, що в межах Українського Полісся озера можна розглядати як басейни нагромадження органічної речовини.

За кількістю і площею переважають озера зі змішаним типом озерного седиментогенезу. Для озер із теригенним типом седименетогенезу характерні незначні потужності відкладів і більші показники середніх глибин. Біогенний тип седиментогенезу характерний для озер із незначною проточністю і максимальним ступенем заповнення улоговини відкладами (ОР > 70 %).

Статистичне опрацювання вмісту головних хімічних компонентів у донних відкладах водойм Українського Полісся засвідчує, що для водойм біогенного типу озерного седиментогенезу середні показники органічної речовини становлять 71,2 % (сухої речовини), Fe_2O_3 – 4,7 %, CaO – 5,4 %, змішаного – 52,7 %, 7,1 %, 4,8 % і теригенного – 18,4 %, 5,8 %, 8,7 %, відповідно.

Диференціація території за типами седиментогенезу відображає специфіку озерного накопичення осадів, має важливе значення для різних напрямів раціонального використання озер, насамперед, як джерела екологічно чистих органічних матеріалів. Очевидно, що для територій із біогенним типом озерного седиментогенезу основним напрямом використання є добування сапропелів – як лікувальних грязей, сировини для косметичних препаратів, кормових добавок, тобто, де

необхідна значна концентрація органічної речовини й мінімальний вміст забруднюючих компонентів. Через унікальность окремих сапропелевих покладів велика частина їх повинна охоронятися, а озера в мальовничих ландшафтах слід використовувати для оздоровленная населення.

Найбільш проточні й пов'язані з водозабором озера з теригенним типом озерного седиментогенезу за кількісними параметрами донних відкладів і у зв'язку з малими середніми потужностями відкладів найменш придатні для добування сапропелевої сировини. Значна проточність водойм зумовлює нагромадження у відкладах екологічно небезпечних складників, що спричиняє вторинне забруднення води. Багато озер із теригенним типом седиментогенезу потребують уваги як об'єкти відновлення і стабілізації екоситуацій.

На територіях, де поширені озера зі змішаним типом озерного седиментогенезу, доцільне добування сировини для приготування сапропелевих добрив, бурових розчинів, компонентів для будівництва.

Залежно від завдань досліджень і використання озер застосовуються різні класифікаційні схеми, які ґрунтуються на хімічному й речовинному складі донних відкладів; їх огляд наведений у працях[25, 26]. Ми дотримуємося схеми, що ґрунтується на геохімічному вивченні даних, які визначають генетичні властивості відкладів: успадкованість озером речовини порід водозбору, зміни седиментогенезу в процесі розвитку лімносистем, нагромадження новоутворених сполук тощо.

Геохімічна індикація умов осадконагромадження у водоймах, виявлення її за допомогою статистичної оцінки розподілу мікроелементів, разом з іншими методами дослідження відображає різноманітну лімнохімічну інформацію, яка має певну цінність у ландшафтознавчо-геохімічних дослідженнях, палеогеохімічних, палеогеографічних і палеолімнологічних реконструкціях, у кореляції осадових товщ і горизонтів, вивченні закономірностей еволюції озер і встановленні їхніх антропогенних змін, у вивченні генезису озерних відкладів, виявленні якості донних відкладів і їх використанні в господарстві залежно від складу та властивостей.

Геохімічними індикаторами є процеси накопичення головних осадоутворюючих компонентів, головні з яких: органічна речовина – показник теплого клімату, літотипу й фації відкладів, трофічного статусу

[25] Ільїна О. В., Ільїн Л. В. Озерні сапропелі Полісся України: види, ресурси, господарське використання. Раціональне використання природних ресурсів в умовах глобальних викликів : колективна монографія / за заг. ред. Т. О. Чайки. Полтава : Астрая, 2025. С. 265–277.

[26] Ільїна О. В., Ільїн Л. В. Конструктивно-географічне оцінювання водних та сапропелевих ресурсів озер та штучних водойм Українського Полісся. *Theoretical and applied aspects of sustainable development of Ukrainian regions* : scientific monograph. Vol. 1. Riga, Latvia : Baltija Publishing, 2025. P. 106–125. DOI https://doi.org/10.30525/978-9934-26-539-6-5

водойм у певному віковому та еволюційному інтервалі його розвитку; концентрація понад 80 % органіки як торфонагромадження – це показник теплого й сухого клімату, обміління водойми, прибережної фації, індикатор раннього голоцену; карбнатонакопичення – процес полігенної седиментації кальциту й доломіту, показник теплого та помірно-вологого клімату; концентрація кальцію понад 30 % (формування вапна) – індикатор евтрофної стадії біогеохемогенного карбонатоутворення та прибережно-субліторальної фації; збільшення частки доломіту і зниження загального карбонатонакопичення – показник зростання вологості, похолодання, посилення аллохтонної седиментації, зниження трофічного рівня водойми; відкладення силікатного матеріалу – процес теригенного осадотворення (пісків, глин, мулів), показник холодного й вологого клімату, зміни якого у напрямку потепління і зменшення вологості відображаються зростанням значень суми і співвідношення Si і Al; співвідношення уламкового, алевритового й тонкодисперсного глинистого матеріалу – індикатор низькотрофного стану середовища (оліготрофних, мезотрофних, малоевтрофних стадій).

Палеолімнологічна інформативність наведених геохімічних індикаторів різна й залежить від походження улоговин озера, характеру осадового комплексу водозбору тощо.

ВИСНОВКИ

Розвиток озерних екосистем (лімносистем) зумовлюється сукупним впливом зональних і азональних чинників і відображає характер зв'язків внутрішнього стану системи із зовнішніми умовами навколишнього середовища. Нагромадження поживних речовин у процесі еволюції сформувало певний тип і рівень трофності, який визначається надходженням речовин, їх акумуляцією і внутрішньоводймним перетвореням.

Сучасні басейни озерної седиментації досліджуваного регіону характеризуються дрібноконтурністю, різноманітністю форм й об'єктів, що зумовлює склад, швидкість утворення і потужність осадової товщі. Вміст макро- і особливо мікроелементів у сучасних відкладах різнотипних водойм засвідчує, що вміст більшості з них помітно варіює. Незначна площа при різних глибинах водойм визначає тісний зв'язок із літогеохімічними особливостями покривних порід водозборів, склад джерел речовини, різноманітність відкладів і стратокомплексів.

Наведені матеріали переконливо підтверджують зміни природного середовища на основі аналізу геохімічної інформації. Діагностика й оцінювання сучасного стану озерних екосистем, що ґрунтується на використанні ландшафтознавчо-геохімічних методів із наступною

структурно-динамічною інтерпретацією даних, дає змогу здійснювати прогноз можливих змін при різному ступені антропогенного впливу й розв'язувати завдання мінімізації негативних впливів.

Серед установлених для водойм регіону видів озерного осадонакопичення домінуючим є органічне. Більшість досліджених водойм є озерами-продуцентами органічної речовини. Ураховуючи роль органічного складника в формуванні відкладів озер, досліджувану територію можна віднести до великої лімногеохімічної області озер-органонагромаджувачів. Закономірності (особливості) седиментації породоутворюючих компонентів у розрізах дає змогу порівнювати динаміку розвитку озер у просторі й часі. Узагальнення великого матеріалу дало можливість виділити у водоймах найпоширеніші різновиди осадових комплексів.

Закономірності розподілу й динаміки хімічних елементів у відкладах різного походження та різнотипних водоймах розширює і поглиблює уявлення теорії гумідного континентального літогенезу з позицій порівняльно-літологічного методу. Практичне значення геохімічного вивчення відкладів водойм закладені в його методичній основі. Розуміння (знання) процесів формування складу відкладів і чинників, які його визначають (контролюють), необхідне для науково обґрунтованого прогнозу розвитку водойм під впливом техногенного навантаження і розробки раціональних схем використання.

Закономірності просторового розподілу, генезису, конфігурації та внутрішньої будови водойм, формування їхніх донних відкладів різних типів, динаміки головних геохімічних праметрів водойм у просторі й часі полягають у тому, що вони мають прямий зв'язок із будовою рельєфу і надр, гідрокліматичними й ґрунтово-рослинними та загалом ландшафтними регіональними умовами.

З'ясування геохімічних особливостей умов озерного осадонакопичення дає можливість за допомогою непрямих геохімічних показників вивчати речовинну сторону взаємодії, закономірності функціонування і динаміки озерних геосистем. Установлення ритмічності або спрямованості в мінливості їх геохімічних показників відкриває можливості передбачення і створення прогнозів. Це потрібно для розробки оптимальних умов гіпергенних перетворень на водозборах і при обґрунтуванні принципів боротьби з антропогенною евтрофікацією водойм, виявленні парагенетичних асоціацій мікроелементів, з'ясуванні узагальнюючих геохімічних показників ландшафтно-геохімічних умов осадонагромадження, оцінюванні ролі зональних й азональних чинників у формуванні геохімічної специфіки осадконагромадження у водоймах, а також для вивчення змін або ритміки певних умов седиментогенезу (природних і антропогенних).

АНОТАЦІЯ

Розглянуті теоретико-методологічні і прикладні аспекти дослідження та можливого господарського використання продуктів озерного седиментогенезу в умовах Полісся України. Виявлені просторово-часові відмінності нагромадження озерних відкладів та їх показників (мінеральної складової, вмісту біогенних елементів та ін.) та особливості поширення лімногеохімічних осадових комплексів. Дослідження умов озерної седиментації дає можливість за допомогою непрямих геохімічних показників вивчати речовинну складову взаємодії, закономірності функціонування і динаміки озерних екосистем. Сучасні басейни озерної седиментації досліджуваного регіону характеризуються дрібноконтурністю, різноманітністю форм й об'єктів, що зумовлює склад, швидкість утворення і потужність осадової товщі. Вміст макро- і особливо мікроелементів у сучасних відкладах різнотипних водойм засвідчує, що більшість з них помітно варіює.

Література

1. Argillier C., Carriere A., Poikane S., Van de Bund W. Lake Hydromorphological Assessment and Monitoring Methodologies. European survey, EUR 31029 EN, Publications Office of the European Union, Luxembourg. 2022. DOI: 10.2760/274896, JRC127847.

2. Cole G. A., Weihe P. E. Textbook of Limnology. 5th ed. Waveland Press. 2016. 440 p.

3. Oakenfold S. Limnology and Freshwater Ecology. Syrawood Publishing House, 2017. 241 p.

4. Bertrand S., Tjallingii R., Kylander M., Wilhelm B., Roberts S., et al. Inorganic geochemistry of lake sediments: A review of analytical techniques and guidelines for data interpretation. *Earth-Science Reviews*. 2024. № 249. 104639. DOI: 10.1016/j.earscirev.2023.104639.

5. Frančišković-Bilinski S., Sakan S. Geochemistry of Water and Sediment. *Water*. 2021. № 13 (5). P. 693. DOI: https://doi.org/10.3390/w13050693

6. Fluet-Chouinard E., Messager M. L., Lehner B., Finlayson C. Freshwater Lakes and Reservoirs. In: Finlayson C., Milton G., Prentice R., Davidson N. (eds) *The Wetland Book*. Springer, Dordrecht. 2018. DOI: https://doi.org/10.1007

7. Hoffman S. Lake sediment geochemistry. In: General Geology. Encyclopedia of Earth Science. Springer, Boston, MA. 1988. DOI: https://doi.org/10.1007/0-387-30844-X_59

8. Ran F., Nie X., Wang S., Xiao T., Yang C., Liu Y., Wang L., Liu Y., Chu X., Li Z. A significant loop of lake sedimentation state links catchment eco-surroundings and lake biogenic regime shifts. *Limnol Oceanogr*. 2023. № 68. P. 1775–1790. DOI: https://doi.org/10.1002/lno.12385

9. Ільїн Л. В. Озерні відклади. Екологічна енциклопедія: У 3 т / редкол.: А. В. Толстоухов (гол. ред.) та ін. Київ : ТОВ «Центр екологічної освіти та інформації», 2008. Т. 3: О–Я. С. 17.

10. Ільїн Л. В. Озерознавство: Укр.-рос. сл. Поняття і терміни. Луцьк : Ред.-вид. відд. «Вежа» Волин. держ. ун-ту ім. Лесі Українки, 2001. 112 с.

11. Шевчук М. Й. Сапропелі України: запаси, якість та перспективи використання. Луцьк : Надстир'я, 1996. 384 с.

12. Малишева Л. Л. Геохімія ландшафтів : навч. посібник. Київ : Либідь, 2000. 472 с.

13. Ільїн Л. В. Ландшафтно-геохімічні аспекти дослідження лімносистем. *Вісник Львівського університету. Серія географічна*. 2006. Вип. 33. С. 130–136.

14. Ilyin L. Geochemical peculiarities of bottom sediments in polytypic lakes of Ukrainian Polissya. *Limnological Review.* 2002. № 2. P. 155–163.

15. Ilyin L. Właściwości geochemiczne osadów dennyh różnych typów jezior Polesia Ukraińskiego. Naturalne i antropogeniczne przeksztalcenia jezior: VI Konferencja limnologiczna. Lublin – Okuninka : Maria Curie-Sklodowska University, 2002. P. 21–22.

16. Ільїн Л. В. Лімнокомплекси Українського Полісся : монографія : у 2-х т. Т. 1. Природничо-географічні основи дослідження та регіональні закономірності. Луцьк : РВВ «Вежа» ВДУ ім. Лесі Українки, 2008. 316 с.

17. Ільїн Л. В. Геохімічні особливості донних відкладів озер Полісся України. *Агрохімія і грунтознавство : Міжвідомчий тематичний науковий збірник*. Харків – Луцьк, 2002. Кн. 4. С. 89–98.

18. Ільїн Л. В., Ільїна О. В. Вплив техногенезу на седиментаційні процеси в озерах Українського Полісся. *Екологічні аспекти регіонального партнерства в надзвичайних ситуаціях* : збірник матеріалів І Міжвузівської науково-методичної конференції (Харків, 21 листопада 2012 р.). Харків : НУЦЗУ, 2012. С. 43–45.

19. Pasichnyk M. P., Ilyin L. V., Ilyina O. V. Composition and Properties of Bottom Sediments of the Shatsk Lakes (West Polesia of Ukraine). *17th International Conference Monitoring of Geological Processes and Ecological Condition of the Environment.* Nov 2023. Vol. 2023. P. 1–5. DOI: https://doi.org/10.3997/2214-4609.2023520145

20. Ільїн Л. В. Лімнокомплекси Українського Полісся. У 2-х т. Т. 2: Регіональні особливості та оптимізація. Луцьк : РВВ «Вежа» Волин. нац. ун-ту ім. Лесі Українки, 2008. 400 с.

21. Ільїн Л. В., Мольчак Я. О. Озера Волині. Лімнолого-географічна характеристика. Луцьк : Надстир'я, 2000. 140 с.

22. Довідник ресурсів сапропелю України. Кн. 1. Волинська область. Київ : ДГП «Північукргеологія», 1994. 194 с.

23. Ilyina O. V., Ilyin L. V. Biogenic Elements of Lake Sediments as Indicators of Natural and Anthropogenic Processes. *Monitoring of Geological Processes and Ecological Condition of the Environment* : 18th International Conference. April 2025, Vol. 2025. P. 1–5. DOI: https://doi.org/10.3997/2214-4609.2025510123

24. Ilyina O., Ilyin L. Forms of Lake Basins of the Ukrainian Polissya Region and Their Transformations in the Process of Accumulation of Bottom Deposits. *GeoTerrace-2023* : International Conference of Young Professionals. Oct 2023. Vol. 2023. P. 1–5. DOI: https://doi.org/10.3997/2214-4609.2023510066

25. Ільїна О. В., Ільїн Л. В. Озерні сапропелі Полісся України: види, ресурси, господарське використання. *Раціональне використання природних ресурсів в умовах глобальних викликів* : колективна монографія ; за заг. ред. Т. О. Чайки. Полтава : Астрая, 2025. С. 265–277.

26. Ільїна О. В., Ільїн Л. В. Конструктивно-географічне оцінювання водних та сапропелевих ресурсів озер та штучних водойм Українського Полісся. Theoretical and applied aspects of sustainable development of Ukrainian regions : scientific monograph. Vol. 1. Riga, Latvia : Baltija Publishing, 2025. P. 106–125. DOI https://doi.org/10.30525/978-9934-26-539-6-5

Information about the authors:
Ilyina Olga Viktorivna,
Candidate of Geographical Sciences,
Associate Professor at the Department
of Hotel and Restaurant business, Tourism and Recreation,
Lesya Ukrainka Volyn National University
13, Voli avenue, Lutsk, 43025, Ukraine

Ilyin Leonid Volodymyrovych,
Doctor of Geographical Sciences,
Professor at the Department
of Hotel and Restaurant business, Tourism and Recreation,
Lesya Ukrainka Volyn National University
13, Voli avenue, Lutsk, 43025, Ukraine

CHAPTER 22

СУЧАСНІ ТЕНДЕНЦІЇ РОЗВИТКУ РІЧКОВИХ СИСТЕМ ПЕРЕДКАРПАТТЯ В УМОВАХ КЛІМАТИЧНИХ ЗМІН ТА АНТРОПОГЕННОГО НАВАНТАЖЕННЯ

Паланичко О. В.
DOI https://doi.org/10.30525/978-9934-26-654-6-22

ВСТУП

Зростаючий вплив сучасних кліматичних змін на гідрологічний режим річок у поєднанні з інтенсивним антропогенним навантаженням (регулюванням русел, будівництвом гідротехнічних споруд, сільськогосподарським освоєнням територій, вирубкою лісів і забрудненням природних вод) зумовлює актуальність і необхідність дослідження сучасних тенденцій розвитку річкових систем. Упродовж історичного розвитку людство накопичило значний обсяг практичних знань про функціонування русел і заплав, однак сучасні кліматичні виклики потребують їх переосмислення в контексті геоекологічної стійкості природних систем.

В умовах глобального потепління змінюється режим атмосферних опадів, зростає частота паводків і посух, що призводить до деградації водних екосистем, активізації ерозійних процесів, переформування русел і погіршення якості води. Аналіз багаторічних гідрометеорологічних спостережень свідчить про те, що Карпатський регіон є однією з найбільш небезпечних територій України щодо виникнення гідрологічних небезпек. Вони формуються внаслідок взаємодії природних і антропогенних чинників (гідрометеорологічних, геолого-геоморфологічних і господарських).

Гідрологічний режим річок Українських Карпат тісно пов'язаний із природними закономірностями функціонування гірсько-передгірних ландшафтів та комплексом проблем взаємодії природи й суспільства.

Передкарпаття характеризується складною геоморфологічною будовою, високою гідрологічною динамікою та значною кількістю малих і середніх водотоків, чутливих до кліматичних коливань. Повені й паводки в межах досліджуваної території мають мінливий характер, окремі навіть катастрофічні, коли швидкості потоків перевищують

середні значення у десятки разів, завдають значних збитків природним і господарським системам.

Останні такі масштабні паводки в басейнах досліджуваних річок відбулися у 2008 та 2020 роках. Вони супроводжувалися порушенням функціонування системи «потік–русло», руйнуванням захисних інженерних споруд, мостів, доріг та комунікацій.

Проведені нами експедиційні дослідження в басейнах річок Передкарпаття й аналіз даних дистанційного зондування Землі дали змогу зафіксувати характер і просторову диференціацію цих змін.

Таким чином, дослідження геоекологічних проблем природно-антропогенних річкових систем Передкарпаття є необхідним для розроблення адаптаційних стратегій управління водними ресурсами й мінімізації негативних екологічних наслідків сучасних кліматичних змін.

Метою дослідження є оцінка сучасного стану річкових систем Передкарпаття, виявлення основних тенденцій їх розвитку, визначення ключових геоекологічних проблем і обґрунтування підходів до збереження та відновлення річкових екосистем.

Об'єктом дослідження є природно-антропогенні річкові системи Передкарпаття (водотоки), що зазнають одночасного впливу кліматичних і господарських чинників.

Предметом дослідження є геоекологічні процеси та зміни стану водних екосистем річок Передкарпаття під впливом кліматичних коливань і антропогенної діяльності.

Методологічну основу дослідження становить геогідроморфологічний підхід[1] і системний аналіз. Для визначення проблеми використовувалися методи аналізу й синтезу наукових джерел. Емпіричну базу сформовано за результатами експедиційних досліджень, GNSS-зйомки, морфометричного аналізу русел, фотограмметрії та фіксації високих рівнів води. Обробка даних здійснювалася із застосуванням комп'ютерних методів і геоінформаційних систем. Аналіз даних дистанційного зондування Землі виконано з використанням QGIS, Google Earth Engine, NASA Giovanni та ArcGIS Online, що дозволило здійснити багатошарове картографування, геостатистичний аналіз і моделювання ризиків деградації річкових систем.

Сучасні наукові дослідження підтверджують істотний вплив кліматичних змін на гідрологічний режим річкових систем Карпатського

[1] Ющенко Ю. С. Геогідроморфологічні закономірності розвитку русел. Чернівці : Рута, 2005. 412 с.

регіону[2]. Для гірсько-передгірних територій характерними є зростання частоти паводків і посилення меженей, що зумовлює активізацію руслових деформацій, ерозії берегів і деградацію прибережних екосистем.

Поєднання кліматичних змін з антропогенним впливом: спрямленням русел, будівництвом гідротехнічних споруд, трансформацією землекористування та видобутком алювіальних відкладів, значно підвищує геоекологічну нестійкість річкових систем[3, 4]. Передумови сучасних геоекологічних досліджень річкових систем Передкарпаття сформувалися в процесі розвитку геологічних і геоморфологічних досліджень регіону[5]. Наприкінці XIX – на початку XX століття А. Ломніцький, В. Тейсейр і Е. Ромер виконали геологічні зйомки, що стали основою «Геологічного атласу Галичини». Подальші дослідження долинних систем і гідрографічної мережі здійснювали С. Павловський, Ю. Чижевський, Ю. Полянський, В. Лозінський та інші. У післявоєнний період геоморфологічне районування Передкарпаття та аналіз еволюції річкової мережі виконали К. Геренчук[6], П. Цись[7], та інші, що сформувало наукову основу сучасних руслознавчих досліджень.

У середині XX ст. науковці Чернівецького університету під керівництвом доцента Є. Матвєєвої розпочали експедиційні та методичні дослідження гідроморфологічних умов річок Прут, Черемош і Сірет у гірській та передгірній частинах, зокрема вивчали функціонування внутріруслових форм і класифікували різновиди русел[8, 9].

Із кінця XX століття руслознавчі дослідження набули геоекологічної спрямованості. Науковцями Київського національного університету

---

[2] IPCC. *Climate Change 2021: The Physical Science Basis*. Cambridge : Cambridge University Press, 2021. 2391 p. URL: https://www.cambridge.org/core/books/climate-change-2021-the-physical-science-basis/415F29233B8BD19FB55F65E3DC67272B (дата звернення: 11.01.2026).

[3] Kondolf G. M. et al. Sustainable sediment management in reservoirs and regulated rivers. *Earth's Future*. 2014. Vol. 2. P. 256. DOI: https://doi.org/10.1002/2013EF000184

[4] Ободовський О. Г., Ярошевич О. Є. Гідроморфологічна оцінка якості річок басейну Верхньої Тиси. Київ : Інтертехнодрук, 2006. 70 с.

[5] Рего М. З., Некос А. Н. Еколого-геоморфологічна характеристика долини Дністра в Передкарпатті. *Людина та довкілля. Проблеми неоекології*. Харків : ХНУ імені В. Н. Каразіна. 2014. № 1-2. С. 45–51.

[6] Природа Українських Карпат / ред. К. І. Геренчук. Львів : Вид-во Львівського ун-ту, 1968. 265 с.

[7] Цись П. М. Геоморфологія УРСР. Львів : Вид-во Львів ун-ту, 1962. 223 с.

[8] Кожурина М. С. Геоморфологічна будова долини ріки Прут у Прикарпатті. *Праці. Експедиція по вивченню Карпат і Передкарпаття*. 1956. Т. III. С. 20–35.

[9] Кожурина М. С. Геоморфологія долини ріки Серет у Прикарпатті *Праці. Експедиція по комплексному вивченню Карпат і Передкарпаття*. 1957. Т. IV. С. 28–43.

імені Тараса Шевченка було обґрунтовано методологію оцінювання гідроморфологічної якості річок відповідно до Водної рамкової директиви ЄС[10], а також розроблено підходи до аналізу вертикальних руслових деформацій і районування басейну Верхнього та Середнього Дністра[11]. Значний внесок у розвиток геогідроморфологічних досліджень зроблено науковцями Чернівецького національного університету імені Юрія Федьковича. У монографії[12] узагальнено результати попередніх досліджень науковців, зокрема розглянуто ключові аспекти формування та розвитку річкових природно-антропогенних систем Передкарпаття, проаналізовано методологію їх дослідження, принципи збалансованого планування та запропоновано методику аналізу територіальної структури молодих річкових ландшафтів.

Таким чином, наявна наукова база створює передумови для комплексного аналізу руслових процесів регіону, однак геоекологічна оцінка природно-антропогенних річкових систем Передкарпаття в умовах сучасних кліматичних змін залишається недостатньо розробленою, що визначає актуальність даного дослідження.

Отримані результати слугують науковою основою для формування стратегій збереження, відновлення та адаптивного управління річковими екосистемами Передкарпаття в умовах подальших кліматичних змін і антропогенного тиску.

1. Територія дослідження та природно-географічні передумови формування річкових систем в межах Передкарпаття

Передкарпаття є перехідною фізико-географічною областю між Українськими Карпатами та Подільською височиною, що зумовлює поєднання гірських, передгірних і рівнинних ландшафтів та формування складної структури річкових систем. Природні умови регіону визначають різноманіття ландшафтно-екологічних комплексів (від гірських лісів у верхів'ях до широких заплавних екосистем у нижніх течіях річок). Це забезпечує високе біорізноманіття, але водночас формує підвищену

[10] Ободовський О. Г., Ярошевич О. Є. Гідроморфологічна оцінка якості річок басейну Верхньої Тиси. Київ : Інтертехнодрук, 2006. 70 с.

[11] Розлач З. В. Аналіз вертикальних руслових деформацій річок басейну Верхнього та Середнього Дністра : автореф. дис. канд. геогр. наук : 11.00.07. Київ, 2008. 22 с.

[12] Ющенко Ю. С., Гончар О. М., Григорійчук В. В. та ін. Гідроекологічне обґрунтування безпечного та збалансованого розвитку річкових природно-антропогенних систем Передкарпаття : монографія. / за ред. Ю. С. Ющенка. Чернівці : Чернівецький нац. ун-т ім. Ю. Федьковича, 2017. 472 с.

вразливість річкових систем до геоекологічних ризиків, зокрема паводків, зсувів і руслових деформацій.

Поєднання природної чутливості передгірних ландшафтів із зростанням антропогенного навантаження визначає специфічні умови функціонування сучасних річкових систем в межах передгір'я, що обґрунтовує доцільність їх комплексного дослідження в контексті кліматичних змін та трансформації природного середовища.

Територією нашого дослідження охоплено Передкарпаття в межах України та прилеглі частини Українських Карпат і Поділля (рис. 1), що характеризуються розвитком розширених ділянок річкових долин, заповнених алювіальними відкладами, та формуванням широких заплавних рівнин. Вона включає передгірні райони Львівської, Івано-Франківської та Чернівецької областей, де сформувалися густі річкові мережі, що належать переважно до басейнів Дністра, Пруту та Сірету.

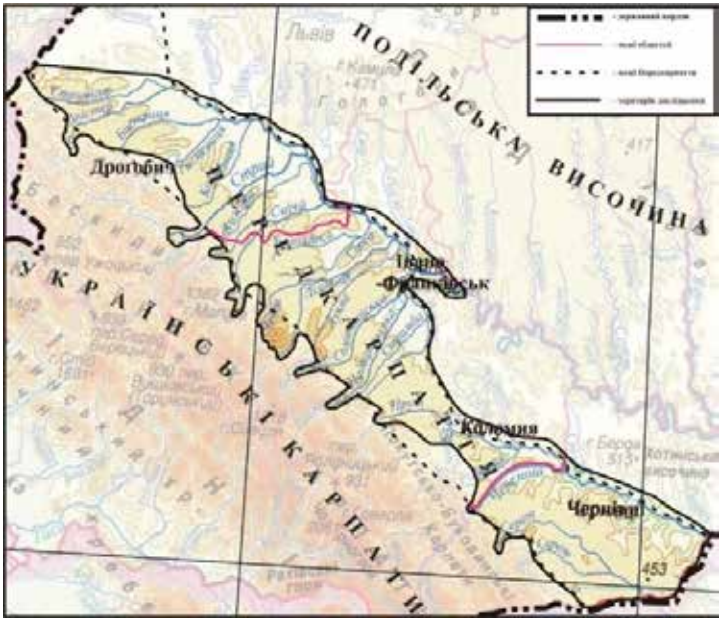


Рис. 1. Картосхема території дослідження[13]

[13] Паланичко О. В. Закономірності руслоформування річок Передкарпаття : автореф. дис. … канд. геогр. наук : 11.00.07. Київ . 2010. 22 с.

У гідролого-геоморфологічному аспекті ця територія виходить за межі класичного геоморфологічного Передкарпаття, поєднуючи типові й специфічні умови формування русел передгірних річок. Це зумовлює використання регіону як репрезентативної тестової ділянки для дослідження руслових процесів, функціонування річкових систем та прояву геоекологічних ризиків у басейнах річок [6].

Передкарпаття займає перехідну фізико-географічну зону між гірською областю Українських Карпат і рівнинною частиною Східно-європейської платформи. Таке положення визначає його роль як природного контакту між двома контрастними морфоструктурними областями, що істотно впливає на формування гідрографічної мережі та особливості стоку. Територія характеризується чергуванням передгірних височин, хвилястих рівнин, широких міжрічкових вододілів і добре розвинених долинних систем.

Наявність значних ухилів поверхні в напрямку від Карпат до рівнинної частини зумовлює інтенсивний поверхневий стік і високу швидкість гідрологічних реакцій на атмосферні опади. Передкарпаття виконує функцію своєрідного транзитного поясу. Адже через нього здійснюється відтік великої частини карпатських вод у басейни середніх і великих рівнинних річок. Висока густота долинної мережі сприяє концентрації стоку та формуванню численних малих і середніх водотоків, що є характерною рисою регіону.

Поєднання гірського водозбірного поясу з передгірною акумулятивною зоною створює передумови для активного розвитку ерозійно-акумулятивних процесів, формування розгалужених руслових систем і широких заплав. Саме ці особливості визначають підвищену чутливість річкових систем Передкарпаття до змін кліматичних умов і антропогенного впливу.

Геологічна будова Передкарпаття сформувалася внаслідок складних тектонічних процесів Карпатської складчастої області та розвитку Передкарпатського крайового прогину. Основу розрізу становлять флішові товщі, моласові та неогенові відклади, перекриті потужним шаром четвертинних алювіальних і делювіальних утворень. Така літологічна різноманітність визначає неоднакову стійкість гірських порід до ерозійних процесів і формує строкату морфологію долин.

Тектонічна структура регіону представлена системою насувів, складок і розломів, що зумовлює блокову будову території та різну інтенсивність вертикальних рухів. Неотектонічні підняття Карпатського масиву сприяють активізації ерозійного врізу річок у верхніх частинах басейнів, тоді як у межах Передкарпатського прогину переважають

акумулятивні процеси, що сприяють формуванню широких долин і розвинених заплав.

Потужні товщі алювіальних відкладів створюють сприятливі умови для формування багаторукавних русел, розвитку меандр і постійної перебудови руслової мережі в межах смуг руслоформування. Це визначає високу морфодинамічну активність річкових систем і їх схильність до горизонтальних деформацій. Водночас на окремих ділянках виходи корінних порід зумовлюють локальну стабілізацію русел і формування порогів та перекатів.

Клімат Передкарпаття є помірно-континентальним з чітко вираженим впливом орографічного бар'єру Карпат. У напрямку від рівнин до гір спостерігається зростання кількості атмосферних опадів і зниження середніх температур, що зумовлює вертикальну кліматичну зональність. Річна сума опадів у передгір'ї становить у середньому 700–900 мм, тоді як у гірських частинах басейнів може перевищувати 1200 мм.

Переважання дощового живлення визначає швидку реакцію річок на зливові опади, що є основною причиною формування короткотривалих, але інтенсивних паводків. Значна частка твердих опадів у холодний період року забезпечує весняне водопілля, однак роль снігового живлення в останні десятиліття поступово зменшується внаслідок підвищення температури повітря.

Кліматичні умови регіону зумовлюють високу мінливість стоку впродовж року, часту зміну фаз водного режиму і значну внутрішньорічну мінливість водності. Поєднання значних опадів, складного рельєфу та малої проникної здатності ґрунтів, створює умови швидкого формування поверхневого стоку й активного перенесення твердого матеріалу.

Гідрографічна мережа Передкарпаття характеризується високою густотою й представленістю великої кількості малих і середніх водотоків. Основні річкові системи досліджуваної території належать до басейнів Дністра, Прута і Сірету, що здійснюють транзит стоку з гірської області до рівнинної частини України.

Переважають гірсько-передгірні річкові системи з паводковим типом режиму. У верхів'ях вони мають вузькі V-подібні долини, значні похили русел і домінування глибинної ерозії. У межах передгір'я долини розширюються, похили зменшуються, активізуються процеси горизонтальних руслових деформацій і формується добре розвинена заплава.

Малі річки в межах території дослідження особливо чутливі до зовнішніх впливів через обмежені розміри водозборів і слабку буферну здатність. Саме вони першими реагують на зміну кліматичних умов

і господарське освоєння території, що робить їх індикаторами загального стану річкових систем Передкарпаття.

В останні десятиліття спостерігається тенденція до зростання частоти гідрологічних небезпечних явищ, що пов'язано як із сучасними кліматичними змінами, так і з трансформацією природного покриву басейнів унаслідок лісокористування, урбанізації та регулювання стоку. Упродовж XX – початку XXI століття басейни річок Передкарпаття зазнали низки значних паводків, наслідки яких збереглися в морфології русел і суттєво вплинули на закономірності їх розвитку.

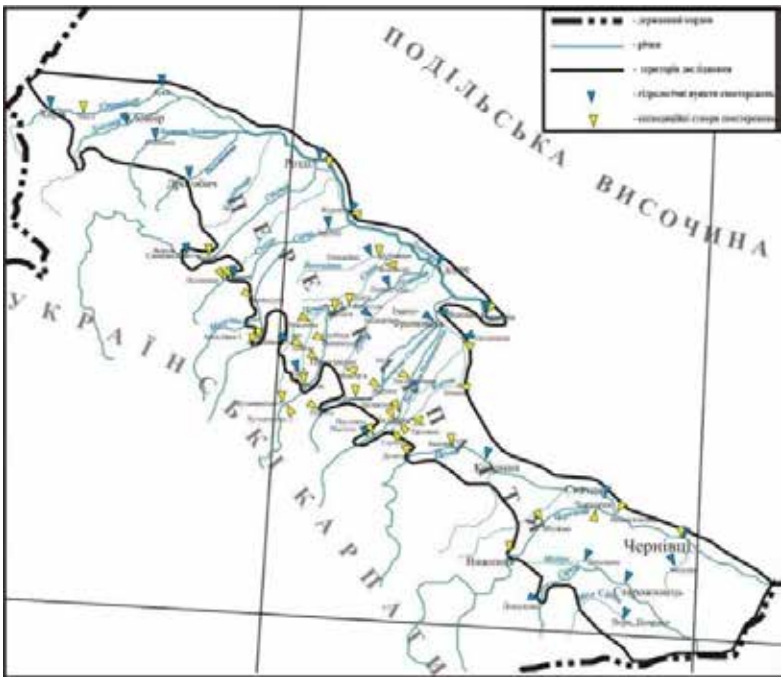


Рис. 2. Схема розміщення створів спостереження на досліджуваних водотоках

Таким чином, фізико-географічне положення, геологічна та тектонічна будова, кліматичні умови й особливості гідрографічної мережі формують комплекс природних передумов розвитку річкових систем Передкарпаття. Поєднання стоку з гірських районів, передгірної акумулятивної зони та паводкового режиму під впливом кліматичних змін, у поєднанні з активним господарським освоєнням передгірних

територій, зумовлює високу гідрологічну та морфодинамічну активність в басейнах річок. Саме ці природні фактори визначають підвищену чутливість річкових систем регіону до сучасних кліматичних змін і антропогенного навантаження, що обґрунтовує необхідність їх комплексного геоекологічного дослідження.

2. Сучасні кліматичні тенденції та водний режим річкових систем в межах Передкарпаття

Сучасні кліматичні зміни суттєво впливають на гідрологічний режим річок Передкарпаття, змінюючи сезонні закономірності стоку та частоту небезпечних гідрометеорологічних явищ. Відомо, що за останні десятиліття спостерігається тенденція до підвищення середньорічної температури повітря та зміни розподілу опадів, що формує нові умови для функціонування річкових систем регіону[14]. У межах Передкарпаття річна сума атмосферних опадів коливається від 700–800 мм у передгір'ях до понад 1000 мм у прилеглих гірських районах, що створює високий рівень поверхневого стоку та сприяє формуванню паводків.

Особливістю гідрологічного режиму є переважання паводків теплого періоду, які виникають під час інтенсивних літніх опадів. Ці паводки відіграють вирішальну роль у руслоформуванні: зростає швидкість течії, змінюється гідравлічна структура потоку, збільшується транспорт наносів, формуються грядові структури та алювіальні «язики» на заплавах.

Аналіз власних експедиційних даних та гідрологічних спостережень показав, що річки Передкарпаття в XX–XXI століттях зазнали щонайменше 5–6 значних паводків, наслідки яких залишилися в русловій морфології та системі «потік–русло». Підвищені витрати води та інтенсивність потоків під час паводків формують локальні зони ерозії та деградації заплав. В умовах недостатньої щільності постійних гідрологічних спостережень нами було застосовано метод кореляції витрат води через модулі паводкового стоку, що дозволило оцінити максимальні витрати води, визначити гідравлічні параметри потоку та локалізувати ділянки з підвищеним геоекологічним ризиком (табл. 1). Результати аналізу максимальних модулів стоку підтверджують нерівномірний просторовий розподіл паводкових піків та концентрацію екстремальних явищ у зонах значного антропогенного впливу.

---

[14] IPCC. *Climate Change 2021: The Physical Science Basis*. Cambridge : Cambridge University Press, 2021. 2391 p. URL: https://www.cambridge.org/core/books/climate-change-2021-the-physical-science-basis/415F29233B8BD19FB55F65E3DC67272B (дата звернення: 11.01.2026).

Таблиця 1

Оцінка максимальних модулів та витрат води на річках в межах Передкарпаття[15]

№ з/п	Річка	Створ	$F_в$, км^2	μ, м^3/с. км^2	Q, м^3/с
1	Стрв'яж	с. Чаплі	500	0,4	200
2	Стрий	с. Розгірче	2500	1,1	2750
3	Свіча	с. Ангелівка (1)	250	2,2	550
4	Свіча	с. Ангелівка (2)	260	2,2	570
5	Свіча	с. Княжолука	700	1,7	1190
6	Сукіль	с. Поляниця	92	2,6	240
7	Сукіль	с. Тисів	138	2,4	330
8	Лімниця	с. Кузьминець (1)	330	1,9	630
9	Лімниця	с. Кузьминець (2)	340	1,9	645
10	Лімниця	с. Ясень	500	1,7	850
11	Лімниця	смт Перегінське	573	1,6	915
12	Лімниця	с. Слобода Рівнянська	615	1,5	925
13	Лімниця	с. Берлоги	715	1,4	1000
14	Чечва	с. Довге Калуське	548	1,25	685
15	Дуба	с. Цінева	130	1,4	180
16	Дуба	смт Рожнятів	135	1,4	190
17	Бистриця Солотвинська	с. Пороги	148	2,7	400
18	Бистриця Солотвинська	с. Раковець	240	2,2	530
19	Бистриця Солотвинська	с. Жураки	400	1,9	760
20	Бистриця Надвірнянська	с. Постоята	525	2	1050
21	Бистриця Надвірнянська	м. Надвірна	580	1,9	1100
22	Бистриця Надвірнянська	с. Назавізов	600	1,9	1140

*Позначення: $F_в$ – площа водозбору; μ – модуль максимального стоку; Q – максимальна витрата води за час паводку.

Внаслідок підвищення температури та зміни інтенсивності опадів в Українських Карпатах існують підвищені ризики виникнення гідрологічних небезпек (катастрофічних паводків), що можна простежити

[15] Паланичко О. В. Закономірності руслоформування річок Передкарпаття : автореф. дис. канд. геогр. наук : 11.00.07. Київ . 2010. 22 с.

за сучасними моделями паводків. Це узгоджується із багаторічними спостереженнями та довгостроковим аналізом стоку основних водотоків в межах території дослідження. Відмітимо, що спостерігаються зміщення піків весняних паводків на літній період і підвищення інтенсивності стоку.

Крім природних факторів, значний вплив на водний режим річок має антропогенне навантаження: інтенсивне сільськогосподарське освоєння території, урбанізація, вирубка лісів, регулювання русел та видобуток алювіальних відкладів.

Поєднання особливостей природних умов в межах передгір'я і антропогенного тиску на ці ландшафти й формує специфічні геоекологічні умови. Вони проявляються у вигляді активізації берегової ерозії, деформації русел, деградації заплав та погіршення екологічного стану водних екосистем.

Використання комплексного підходу, що поєднує експедиційні дані, поперечні профілі русел, характеристики паводкового стоку та супутникові спостереження, дозволяє не лише оцінити сучасний стан річкових систем, а й **розробити адаптаційні стратегії збереження водних екосистем** і зменшення наслідків катастрофічних паводків.

Вивчення досвіду національних і міжнародних результатів досліджень, а також проведені власні, підтверджує те, що локальні тенденції річкових процесів у межах Передкарпаття узгоджуються із загальними змінами клімату та ризиками виникнення гідрологічних небезпек.

3. Антропогенне навантаження на річкові системи в межах території дослідження

Активна трансформація річкових ландшафтів розпочалася ще у XIX столітті, а найінтенсивніша фаза припала на середину XX століття, коли масово споруджувалися гідротехнічні об'єкти, мости, дамби та розроблялися руслові кар'єри. Аналіз картографічних матеріалів, космознімків і польових спостережень підтверджує, що практично всі передгірні ділянки основних річок зазнали істотних антропогенних перетворень.

Антропогенний вплив на річкові системи Передкарпаття проявляється на різних просторових рівнях (від загальнобасейнового до локального) і є одним із визначальних чинників сучасного руслоформування. На басейновому рівні він реалізується через трансформацію підстилаючої поверхні, зміну землекористування та опосередковано через вплив на водний режим і стік наносів. На місцевому рівні антропогенна діяльність безпосередньо змінює морфологію русел, стан заплав і гідравлічні характеристики потоків.

Зміни водного режиму річок зумовлюються як кліматичними тенденціями, так і господарським освоєнням басейнів. Хоча вплив знеліснення на формування катастрофічних паводків залишається дискусійним, його роль у посиленні ерозійних процесів і надходженні наносів у річкову мережу є очевидною. Під час інтенсивних паводків зростає винос уламкового матеріалу з гірських частин басейнів, що впливає на гранулометричний склад руслоформуючих відкладів і характер руслових деформацій.

Протилежним за напрямом чинником є вилучення алювію з русел. Неконтрольований видобуток руслового матеріалу (рис. 3). спричиняє пониження дна, деформацію поперечних профілів, руйнування островів і зміну транзитних властивостей системи поверхневого стоку. Наслідком є підвищення відносної висоти заплав і терас, зростання ролі твердих донних виступів та зміна гідравлічної структури потоку.

Рис. 3. Відбір алювію із русла р. Лімниця в с. Ясень

Важливим сучасним проявом антропогенного впливу є збільшення ролі «деревного наносу». Накопичення деревного матеріалу в руслах і біля мостових переходів спричиняє локальні затори, підпори води та перебудову русел під час паводків (рис. 4).

Потужним чинником трансформації руслових систем є розвиток берегозахисних і руслорегулюючих споруд. Дамби, підпірні стінки, спрямлення русел і транспортні насипи звужують смугу руслоформування, змінюють умови заплавного затоплення й структуру паводкових потоків. У багатьох випадках такі заходи здійснюються без достатнього геоморфологічного обґрунтування, що призводить до формування морфологічно нестійких ділянок русел (рис. 5).

Рис. 4. Частково зруйнований міст через р. Чечву біля с. Довга Калуська
(Видно велику кількість «деревного наносу» і гребінь гряди, що зупинилася і частково розмита перед мостом)

Рис. 5. Розмив лівого берега і полотна дороги перед мостом через р. Лімницю у смт Перегінське

На локальному рівні антропогенний вплив проявляється у трансформації гирлових ділянок приток, редукції розгалужених русел і зміні умов взаємодії паводкових потоків. Господарська діяльність формує антропогенні руслові ділянки та нетипові морфологічні форми, що потребують спеціальних підходів до їх дослідження.

Антропогенне навантаження є особливо відчутним на малих річках, де інтенсивність господарської діяльності значно перевищує швидкість

природних морфодинамічних процесів. Внаслідок цього кількість ділянок із відносно природними умовами функціонування руслово-заплавних систем у Передкарпатті постійно скорочується.

Рис. 6. Вигляд каналізованої ділянки русла р. Ворони біля с. Отинія

Таким чином, сучасний стан річкових систем в межах Передкарпаття визначається інтегрованою дією природних і антропогенних чинників, серед яких господарська діяльність відіграє провідну роль. Це обумовлює необхідність комплексного руслознавчого аналізу антропогенно трансформованих ділянок та наукового обґрунтування заходів управління русловими процесами й геоекологічними ризиками.

4. Геоекологічні наслідки сучасних кліматичних змін та антропогенного навантаження на річкові системи Передкарпаття

Сучасний розвиток річкових систем в межах Передкарпаття відбувається в умовах одночасної дії двох провідних трансформаційних чинників: кліматичних змін і зростаючого антропогенного навантаження. Зміни режиму опадів, температури повітря та частоти небезпечних гідрологічних явищ у поєднанні з інтенсивним господарським освоєнням долин, русел і заплав формують нові умови функціонування руслово-заплавних комплексів. Внаслідок цього порушується природна морфодинамічна рівновага річкових систем, змінюються їх гідрологічні й геоморфологічні режими, трансформуються екосистеми та зростають геоекологічні ризики для прирічкових територій.

Польові та дистанційні дослідження, виконані після проходження катастрофічних паводків 2008 і 2020 років, засвідчили суттєві зміни та перетворення руслово-заплавних комплексів основних річок регіону. Виявлено, що характер сучасних змін русел визначається поєднанням зростання паводкової активності, зміни гранулометричного складу наносів, антропогенного звуження смуг руслоформування та втручання в систему поверхневого стоку.

Особливо чітко ці закономірності проявляються при переході від гірських до передгірних і рівнинних ділянок течії, де формується алювіальне середовище та розвивається багаторукавність русел.

Одним із ключових геоекологічних наслідків сучасних змін є зростання небезпеки затоплень і підтоплень. Експедиційні спостереження показали, що просторовий розподіл зон затоплення визначається не лише величиною паводкових витрат, але й морфологією долин, гідрогеологічними умовами та ступенем антропогенної трансформації заплав. Найбільш небезпечними є понижені ділянки долин, вузли злиття великих річок, зони штучного звуження водопропускного коридору дамбами, насипами та транспортною інфраструктурою. Водночас на розширених багаторукавних ділянках навіть катастрофічні паводки часто супроводжуються відносно невеликими амплітудами рівнів води.

Фіксація міток високих вод і нівелювання поперечних профілів русел дозволили встановити сучасні амплітуди коливань рівнів і оцінити глибини та швидкості потоків під час паводків. Отримані дані підтверджують, що на передгірних ділянках із розвиненою русловою багаторукавністю енергія паводкових потоків частково розсіюється, тоді як на стиснутих гідротехнічними спорудами ділянках формуються локальні підпори та підвищені гідродинамічні навантаження.

Морфологічні наслідки катастрофічних паводків проявляються у розвитку комплексу руслових деформацій різного ієрархічного рівня. До найбільш характерних належать розширення русла за рахунок розмиву заплавних берегів, активізація або зміна положення основних проток у розгалужених руслах, формування нових звивин, перебудова внутрішньої структури багаторукавних систем. Такі зміни мають як природний характер, так і чітко виражену антропогенну обумовленість, зокрема у місцях втручання в руслові процеси.

Важливим геоекологічним наслідком є взаємодія руслових деформацій з інженерною інфраструктурою. Мости, дамби, берегоукріплення і транспортні насипи (рис. 7–10) часто стають чинниками локального звуження потоку, формування інтенсивних струменів і розвитку глибинної та бічної ерозії.

Рис. 7. Розмив високого терасового лівого берега р. Стрий за рахунок розвитку крупної звивини біля шосе Львів – Чоп (с. Гірне)

Рис. 8. Напівзруйнований міст на р. Болохівка біля с. Дубовиця

Рис. 9. Розмив дамби обвалування на правому березі р. Бистриця Надвірнянська вище с. Черніїв
(На другому плані видно більш потужну дамбу обвалування ставка)

Рис. 10. Розмив шпори на р. Бистриця Надвірнянська біля с. Цуцилів

Це зумовлює підмив опор, руйнування захисних споруд і розвиток аварійних ситуацій під час паводків. Особливу роль у цьому відіграє накопичення «деревного наносу» (рис. 8), який закриває підмостові отвори, спричиняє підпори рівнів води й перенаправлення потоків по заплаві.

Специфічним сучасним чинником трансформації руслових систем є багаторічний відбір алювію з русел і заплав. Видобуток руслових матеріалів призводить до пониження дна, зміни співвідношення між глибинною й бічною ерозією, порушення рівноваги між надходженням і виносом наносів. У поєднанні з паводковою активністю це формує умови для прискореного врізання русел, зміни їх планової структури та підвищення небезпеки руйнування інженерних споруд.

Загалом сучасний стан руслово-заплавних систем в межах Передкарпаття характеризується підвищеною морфодинамічною нестійкістю. Зростання частоти катастрофічних паводків у поєднанні з антропогенним звуженням долин, вилученням алювію, фрагментацією заплав і втручанням у структуру русел формує комплекс взаємопов'язаних геоекологічних ризиків: небезпеку затоплень, руйнування інфраструктури, деградацію заплавних екосистем і втрату природної буферної ролі долин.

Таким чином, сучасні кліматичні тенденції та антропогенне навантаження діють у тісній взаємодії, формуючи нову якість функціонування річкових систем Передкарпаття. Це обумовлює необхідність переходу від локальних інженерних рішень до комплексного управління руслово-заплавними системами, яке повинно ґрунтуватися на врахуванні природної морфодинаміки, допустимих меж антропогенного втручання та прогнозі змін гідрологічного режиму в умовах подальших кліматичних трансформацій.

ВИСНОВКИ

Сучасні річкові системи Передкарпаття функціонують в умовах поєднаної дії кліматичних змін та інтенсивного антропогенного впливу, що призводить до порушення їх природної морфодинамічної та гідрологічної рівноваги.

Зміна режиму опадів і зростання частоти катастрофічних паводків посилюють руслові деформації, інтенсифікують ерозійно-акумулятивні процеси та змінюють структуру руслоформуючих наносів.

Антропогенне навантаження, пов'язане з регулюванням русел, будівництвом дамб і мостів, освоєнням заплав і відбором алювію, суттєвим зменшенням смуги руслоформування, що призводить до врізання русел і деградації заплавних ландшафтів. Порушення природного балансу твердого стоку та штучні зміни бічних обмежень русел формують ділянки з нехарактерними для природних умов морфологічними структурами та підвищеною нестійкістю руслових процесів.

Виявлено зростання геоекологічних ризиків для прирічкових територій, зокрема підвищення небезпеки паводкових затоплень,

руйнування інженерних споруд і втрати природних руслово-заплавних комплексів.

Сучасний стан річкових систем Передкарпаття характеризується поступовим скороченням ділянок з відносно природними умовами функціонування, що ускладнює як наукові руслознавчі дослідження, так і ефективне управління річковими ландшафтами.

Отримані результати формують наукове підґрунтя для розроблення стратегій екологічно збалансованого управління річковими системами, відновлення природної морфодинаміки русел і збереження заплавних екосистем в межах досліджуваної нами території.

АНОТАЦІЯ

Досліджено сучасні тенденції розвитку річкових систем в межах Передкарпаття в умовах кліматичних змін та антропогенного навантаження. **Проблематика дослідження** полягає у порушенні природної морфодинамічної рівноваги річок, деградації руслово-заплавних комплексів та зростанні геоекологічних ризиків для прирічкових територій. Виявлено, що зміни гідрологічного режиму, частота катастрофічних паводків, інтенсивне господарське освоєння долин та регулювання русел спричиняють трансформацію руслових форм і структури заплав. Проведені польові дослідження, аналіз космознімків і картографічних матеріалів дозволили виділити характерні види деформацій русел, зокрема розмиви берегів, зміни проток і активізацію звивин. Встановлено закономірності взаємодії природних і антропогенних чинників, що призводять до локальних і регіональних змін руслово-заплавних комплексів. Отримані дані підкреслюють вплив антропогенних трансформацій на ерозійно-акумулятивні процеси та руслоформуючі відклади. Результати дослідження можуть бути використані для розробки комплексного управління річковими системами регіону, оцінки геоекологічних ризиків і збереження природних та антропогенних ландшафтів. Результати дослідження підкреслюють актуальність системного підходу до вивчення та моніторингу сучасних змін річкових систем Передкарпаття.

Література

1. Заячук М. Д., Костащук І. І., Пасічник М. Д., Паланичко О. В., Мельник А. А. Гідроекологічна оцінка стану молодого ландшафту річки Сірет в межах України. *Науковий вісник Херсонського державного університету. Серія «Географічні науки»* Вип. 20. Херсон, 2024. С. 46–55. DOI: https://doi.org/10.32999/ksu2413-7391/2024-20-6

2. Заячук М. Д., Ющенко Ю. С., Пасічник М. Д., Паланичко О. В., Настюк М. Г. Методичні підходи оцінювання стану й управління молодими річковими ландшафтами в умовах антропогенного врізання річок (на прикладі Гірського краю Українських Карпат). *Український географічний журнал*. № 1 (129). 2025. С. 27–38. DOI: https://doi.org/10.15407/ugz2025.01.027

3. Ковальчук І. П. Регіональний еколого-геоморфологічний аналіз Львів : Інститут українознавства, 1997. 440 с.

4. Кожурина М. С. Геоморфологічна будова долини ріки Прут у Прикарпатті. *Праці. Експедиція по вивченню Карпат і Передкарпаття*. 1956. Т. III. С. 20–35.

5. Кожурина М. С. Геоморфологія долини ріки Серет у Прикарпатті *Праці. Експедиція по комплексному вивченню Карпат і Передкарпаття*. 1957. Т. IV. С. 28–43.

6. Кравчук Я. С. Геоморфологія Передкарпаття. Львів : Меркатор, 1999. 188 с.

7. Ободовський О. Г., Ярошевич О. Є. Гідроморфологічна оцінка якості річок басейну Верхньої Тиси. Київ : Інтертехнодрук, 2006. 70 с.

8. Паланичко О. Вивчення умов руслоформування річок Передкарпаття в межах алювіальних рівнин. *Проблеми геоморфології і палеогеографії Українських Карпат і прилеглих територій*. Вип. 1 (15). Львів, 2023. С. 48–65. ISSN 2519–2620. DOI: http://dx.doi.org/10.30970/gpc.2023.1.3947.

9. Паланичко О. В. Аналіз антропогенного впливу на русла та заплави річок Передкарпаття. *Науковий вісник Чернівецького ун-ту: Географія.* Чернівці : Рута, 2009. Вип. 459. С. 70–72.

10. Паланичко О. В. Закономірності руслоформування річок Передкарпаття : автореф. дис. канд. геогр. наук : 11.00.07. Київ, 2010. 22 с.

11. Паланичко О. В. Основні закономірності руслоформування річок Передкарпаття. *Наук. вісник Чернівецького ун-ту.* Вип. 633–634: Географія. Чернівці : Чернівецький нац. ун-т, 2012. С. 21–24.

12. Паланичко О. В., Кирилюк А. О. Основні геоекологічні проблеми в басейнах річок Передкарпаття. *Науковий вісник Ужгородського університету*. *Серія. Географія. Землеустрій. Природокористування.* Вип. 1. Ужгород : Ужгородський національний університет, 2013. С. 102–106.

13. Паланичко О. В., Пасічник М. Д., Барладин О. В. Особливості формування русло-заплавного комплексу річки Сучава (в межах України). *Наук. вісник Чернівецького ун-ту*. Вип. 696: Географія. Чернівці : Чернівецький нац. ун-т, 2014. С. 26–29.

14. Паланичко О. В., Ющенко Ю. С. Аналіз стану річкових природно-антропогенних систем Передкарпаття (в межах України) в результаті дії паводків. *Геополітика і екогеодинаміка регіонів.* Сімферополь : КНЦ, 2014. Том 10. Вип. 1. С. 788–794.

15. Палієнко В. П. Геоморфологічне районування / *Географічна енциклопедія України*. Київ, 1989. Т. 1. 257 с.

16. Природа Українських Карпат / ред. К. І. Геренчук. Львів : Вид-во Львівського ун-ту, 1968. 265 с.

17. Рего М. З., Некос А. Н. Еколого-геоморфологічна характеристика долини Дністра в Передкарпатті. *Людина та довкілля. Проблеми неоекології*. Харків : ХНУ імені В. Н. Каразіна. 2014. № 1–2. С. 45–51.

18. Розлач З. В. Аналіз вертикальних руслових деформацій річок басейну Верхнього та Середнього Дністра : автореф. дис. … канд. геогр. наук : 11.00.07. Київ, 2008. 22 с.

19. Цись П. М. Геоморфологія УРСР. Львів : Вид-во Львів ун-ту, 1962. 223 с.

20. Ющенко Ю. С. Геогідроморфологічні закономірності розвитку русел. Чернівці : Рута, 2005. 412 с.

21. Ющенко Ю., Пасічник М., Николаєв А., Паланичко О., Бузей О. В. Зміни режиму водного стоку річки Сірет у період глобального потепління. *Наукові перспективи*. 2023. № 11 (41). С. 410–434. DOI: https://doi.org/10.52058/2708-7530-2023-11 (41)-419-434

22. Ющенко Ю., Пасічник М., Паланичко О., Вудвуд М., Закревський О. () Природний територіальний устрій ландшафту р. Прут в межах Чернівецької області, його антропогенні трансформації та особливості функціонування системи потік-русло-заплава. *Науковий вісник Чернівецького університету*: *Географія.* Чернівці, 2023. № 845. С. 41–51. DOI: https://doi.org/10.31861/geo.2023.845.41-51

23. Ющенко Ю. С., Гончар О. М., Григорійчук В. В. та ін. Гідроекологічне обґрунтування безпечного та збалансованого розвитку річкових природно-антропогенних систем Передкарпаття : монографія / за ред. Ю. С. Ющенка. Чернівці : Чернівецький нац. ун-т ім. Ю. Федьковича, 2017. 472 с.

24. Ющенко Ю. С., Заячук М. Д., Пасічник М. Д., Паланичко О. В., Мельник А. А. Методичні аспекти гідроморфологічного аналізу антропогенної трансформації річкового ландшафту (на прикладах р. Черемош). *Український журнал природничих наук*. № 11. 2025. С. 325–344. DOI: https://doi.org/10.32782/naturaljournal.11.2025.34

25. Didovets Yu., Krysanova V., Bürger G., Snizhko S., Balabukh V., Bronstert A. Climate change impact on regional floods in the Carpathian

region. *Journal of Hydrology: Regional Studies.* Vol. 22. April 2019. DOI: https://doi.org/10.1016/j.ejrh.2019.01.002

26. IPCC. *Climate Change 2021: The Physical Science Basis*. Cambridge : Cambridge University Press, 2021. 2391 p. URL: https://www.cambridge.org/core/books/climate-change-2021-the-physical-science-basis/415F29233B8BD19FB55F65E3DC67272B (дата звернення: 11.01.2026).

27. Kondolf G. M. et al. Sustainable sediment management in reservoirs and regulated rivers. *Earth's Future*. 2014. Vol. 2. P. 256 https://doi.org/10.1002/2013EF000184

28. Pasichnyk, M., Yushchenko, Y., Palanychko, O., Melnyk, A. and Darchuk, K. (2025).Remote Sensing and GIS in the Research of Young River Landscape. *Grassroots Journal of Natural Resources*. № 8 (1). P. 163–189. DOI: https://doi.org/10.33002/nr2581.6853.080106

29. Yushchenko Y., Pasichnyk M., Zaiachuk M., Palanychko O., Nastiuk M. Hydromorphological identification of the classes of mountain and plain rivers. *Journal of Geology, Geography and Geoecology*. 2026. № 34 (4). P. 878–892. DOI: https://doi.org/10.15421/112575

Information about the author:
Palanychko Olha Viktorivna,
Candidate of Geographical Sciences,
Associate Professor at the Department
of Geography of Ukraine and Regional Studies,
Yuriy Fedkovych Chernivtsi National University
2, Mykhailo Kotsiubynsky street, Chernivtsi, 58012, Ukraine

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: 2025. gada 30. decembris
Tirāža 300 eks.