

CHAPTER «AGRICULTURAL SCIENCES»

IDENTIFICATION OF EROSION-PRONE AREAS OF SOIL COVER IN THE ZAPORIZHZHIA REGION

ВИЯВЛЕННЯ ЕРОЗІЙНО НЕБЕЗПЕЧНИХ ДІЛЯНОК ГРУНТОВОГО ПОКРИВУ В ЗАПОРІЗЬКІЙ ОБЛАСТІ

Maksym Hanchuk¹

Viktoriiia Skyba²

DOI: <https://doi.org/10.30525/978-9934-26-631-7-3>

Abstract. The work carried out a comprehensive study of the erosion hazard of soil cover within the Zaporizhzhia region using modern tools for remote sensing of the Earth, geoinformation analysis, and methods of landscape and ecological assessment. The relevance of the study is determined by the high intensity of degradation processes in the region, which belongs to the steppe and dry-steppe natural zones of Ukraine and is characterized by an arid climate, weak natural forest cover, a high level of land plowing, and significant man-made load. Under such conditions, the soils of the region are particularly vulnerable to water and wind erosion, which leads to the loss of topsoil, reduced productivity, and degradation of natural ecosystems. The microclimatic features of the Zaporizhzhia region significantly affect the intensification of erosion processes. Uneven distribution of precipitation, frequent droughts, elevated air temperature, and low relative humidity contribute to drying of the upper soil layer, reducing its structure and stability, which increases both water and wind erosion. *Methodology.* The method of work is to identify the spatial distribution of erosion-hazardous areas and determine the factors that shape and intensify

¹ Candidate of Agricultural Sciences, Associate Professor,
Head of Department of Geocology and Land Management,
Dmytro Motornyi Tavria State Agrotechnological University, Ukraine

² Candidate of Agricultural Sciences, Associate Professor,
Associate Professor of Department of Geocology and Land Management,
Dmytro Motornyi Tavria State Agrotechnological University, Ukraine

erosion processes. For this, Sentinel-2 and Landsat 8/9 satellite images, the SRTM digital terrain model, and national geodata on justifications and land use were used. The methodological basis includes the calculation of spectral indices (NDVI, ER), analysis of the structure of vegetation cover and the degree of surface destruction, as well as assessment of morphometric characteristics of the relief – steepness, exposure, horizontal and vertical curvature of the surface. Particular attention is paid to the assessment of sloping areas, arable land, and areas of intensive land use, where soil erosion and deflation are most pronounced. *Results.* The study created cartographic models of erosion-prone areas, which allowed us to identify zones with varying degrees of risk. It was found that the most vulnerable are: plowed slopes with a steepness of more than 3 – 5°; areas with a reduced NDVI vegetation index during the growing season; sandy and sandy loam soils of the southern regions of the region; zones of intensive land use and degraded agricultural landscapes around ravines and gullies. Particular attention is paid to the assessment of sloping areas, arable land, and areas of intensive land use, where soil erosion and deflation are most pronounced. *Practical implications.* The results obtained have practical significance for the development of regional land protection programs, planning anti-erosion measures, and improving the structure of agricultural landscapes. The constructed maps can be used by government agencies, agricultural enterprises, environmental organizations, and scientific institutions as a tool for monitoring soil conditions and making decisions on optimizing land use. *Value/originality.* The study emphasizes the need to transition to systematic environmental monitoring, implement modern remote sensing technologies, and develop forest reclamation, agrotechnical, and hydrotechnical measures to minimize the risks of further soil degradation in the Zaporizhzhia region.

1. Вступ

Оцінка ерозійно небезпечних ділянок ґрунтового покриття є надзвичайно актуальним завданням з огляду на кілька ключових факторів, що мають значний вплив на екологічну та економічну стабільність Запорізької області.

Ерозія ґрунтів – це один із найгостріших проявів деградації земель, що призводить до втрати родючого шару, погіршення структури

грунту та зниження його здатності утримувати вологу. Для Запорізької області, де сільське господарство є однією з провідних галузей економіки, ці процеси становлять пряму загрозу для врожайності, продовольчої безпеки та сталого розвитку. Зменшення родючості ґрунтів веде до зниження прибутків фермерських господарств та збільшення витрат на добрива і меліорацію.

Сучасні кліматичні умови, що характеризуються частими посухами, зливами та сильними вітрами, значно посилюють процеси вітрової та водної ерозії. Запорізька область, розташована у степовій зоні, особливо вразлива до цих явищ. Тому своєчасне виявлення та моніторинг ерозійно небезпечних ділянок є критично важливим для розробки ефективних заходів із захисту ґрунтів та адаптації до змін клімату.

Проблема деградації земель вимагає перегляду підходів до землекористування. Визначення конкретних ділянок, схильних до ерозії, дозволить впроваджувати точні та цільові заходи, такі як контурне землеробство, заліснення схилів, створення полезахисних смуг. Це дасть змогу не тільки зупинити процеси деградації, а й сприяти відновленню родючості ґрунтів.

Застосування сучасних технологій, таких як дистанційне зондування Землі (ДЗЗ) та геоінформаційні системи (ГІС), дозволяє проводити широкомасштабний моніторинг ґрунтового покриття з високою точністю та швидкістю. Це дає можливість оперативно отримувати актуальні дані, будувати прогностичні моделі та створювати інтерактивні карти ерозійної небезпеки, що є незамінним інструментом для органів влади, аграріїв та науковців.

Метою роботи є виявлення просторового розподілу ерозійно небезпечних ділянок та визначення чинників, що формують і посилюють ерозійні процеси. Дослідження дасть змогу не лише оцінити поточний стан ерозійних процесів, але й визначити найбільш вразливі ділянки для подальшої розробки цільових ґрунтозахисних заходів. Результати роботи можуть бути використані органами місцевого самоврядування, фермерськими господарствами та науковими установами для підвищення ефективності управління земельними ресурсами та забезпечення сталого розвитку регіону.

2. Аналіз останніх досліджень і публікацій

Роботи з моніторингу деградаційних процесів в Україні проводились ДУ "Науковий центр аерокосмічних досліджень Землі ІГН НАН України". Особливо слід відмітити дослідження, в якому представлена модель оцінки ризику деградації земель, що враховує зміни рослинного покриву і динаміки ерозії ґрунтів на прикладі визначення ризику деградації земель піщаних арен Херсонської області за два періоди: 1983–1991 рр. та 1991–2010 рр., з використанням космічних знімків Landsat 5/TM [2]. Під керівництвом академіка НАН України В.І. Лялько було розроблено підхід для експрес-оцінки території за ступенем ерозійної небезпеки з використанням даних цифрової моделі рельєфу, кліматичних факторів та рослинності [1].

У дослідженнях вітчизняних вчених були проаналізовані різні підходи до використання даних дистанційного зондування (ДЗЗ) та ГІС для моніторингу та оцінки ерозійних процесів. Зокрема, розглядалися:

- аспекти застосування ДЗЗ у моніторингу земель [3-6];
- основні методи оцінки ерозії на великих територіях за допомогою ДЗЗ [7];
- принципи виявлення потенційно небезпечних ділянок із використанням ГІС [8].

Крім того, були обґрунтовані підходи до створення моделей водної ерозії ґрунтів на основі просторового моделювання в Україні та світі [9]. Визначено критерії та кількісні оцінки для діагностики деградації ґрунтів [10]. Також проведено комплексну оцінку інтенсивності ерозії в річкових басейнах України [11], враховуючи енергію рельєфу, густоту розчленованості, інтенсивність змиву ґрунтів та інші показники.

3. Матеріали та методика дослідження

Для виконання дослідження з оцінки ерозійно небезпечних ділянок ґрунтового покриву було використано комплекс матеріалів, які умовно можна поділити на супутникові дані дистанційного зондування Землі, картографічні матеріали та допоміжну інформацію.

Оптичні знімки середньої та високої просторової роздільності (у даному дослідженні використовувались: Landsat 8-9). Дані використовувались для розрахунку спектральних індексів (NDVI, ER), що дозво-

ляють оцінити щільність рослинного покриття та його здатність захищати ґрунт від ерозійних процесів.

Цифрова модель рельєфу (ЦМР) SRTM та ALOS PALSAR для розрахунку морфометричних параметрів рельєфу (крутизна схилів, експозиція, розчленованість поверхні). Ґрунтові карти масштабу 1:100 000, що містять дані про типи та механічний склад ґрунтів, їх еродованість і водопроникність.

Метеорологічна інформація (опадів) з баз даних Укргідрометцентру, що дозволило оцінити кліматичні фактори розвитку водної та вітрової ерозії. Польові спостереження та геодезичні вимірювання, проведені на вибіркових ділянках для перевірки достовірності результатів дешифрування супутникових даних. Матеріали попередніх ґрунтових обстежень і наукових публікацій щодо ерозійних процесів у досліджуваному регіоні.

Геоінформаційні системи (QGIS) для інтеграції різномірних просторових даних, створення тематичних карт та моделювання ерозійної небезпеки.

Таким чином, у дослідженні було використано комплекс дистанційних, картографічних та польових матеріалів, що забезпечує комплексний підхід до оцінки ерозійно небезпечних ділянок та підвищує достовірність результатів.

Методика досліджень базується на аналізі матеріалів аерокосмічної зйомки. Перший етап – збір первинного матеріалу: цифрова модель рельєфу (*DEM*), карта деградації ґрунтів Національного атласу України, космознімки, розміщені у відкритому доступі (для приладу на офіційному сайті Геологічної служби США [13]) для характеристики рослинності за індексом *NDVI*, усереднена кількість опадів (*R*) за 30 років за гідрометеорологічними станціями. Другий етап – розрахунок первинних карт на всю територію Запорізької області: індексу інтенсивності ерозійного розчленування рельєфу (*ER*), кількості опадів (*R*) та розподілу значень сумарного індексу (*NDVI*). Усі розрахунки виконувались із застосуванням програми по обробці космічних знімків QGIS. Третій етап – розрахунок модифікованого індексу *ER* з урахуванням кількості опадів (*R*) і рослинності за індексом *NDVI* та його аналіз.

4. Передумови розвитку ерозійних процесів

Фактори, що визначають виникнення та активність ерозійних процесів, умовно поділяють на дві групи: природні та соціально-економічні, зумовлені господарською діяльністю людини. У сучасних умовах ерозія, як правило, формується під впливом поєднання обох груп чинників. Природні фактори створюють передумови для розвитку процесу, тоді як необґрунтована виробнича діяльність людини виступає ключовою причиною його інтенсифікації.

До природних факторів належать: особливості рельєфу, кліматичні умови, кількість та інтенсивність опадів, швидкість і напрям вітру, температурний режим, характер рослинного покриву та властивості самого ґрунту.

Водна ерозія значною мірою залежить від гідрометеорологічних умов: частоти та сили злив, товщини снігового покриву, глибини промерзання ґрунтів, швидкості танення снігу, а також морфометрії схилів (їх крутизни, довжини та форми). Наприклад, на схилах з опуклим профілем, при незначному ухилі (до 2°) верхні ділянки практично не зазнають змивання, однак зі збільшенням крутизни донизу інтенсивність ерозійних процесів зростає. Доведено, що найбільш виражені вони на коротких схилах (100–200 м), де середня крутизна сягає 2,8–3°. Натомість на довгих схилах (понад 700 м) середній ухил зменшується до 1,5–2,1°, відповідно знижується й рівень еродованості ґрунтів.

Вітрова ерозія найчастіше проявляється на відкритих випуклих формах рельєфу та схилах, орієнтованих у напрямку переважаючих вітрів.

Визначальним фактором у розвитку будь-якого типу ерозії, як і у ґрунтоутворенні загалом, виступає клімат. Найбільший вплив мають кількість і характер випадання атмосферних опадів та швидкість вітру. Так, у степовій зоні головним чинником розвитку водної ерозії є зливові опади, тоді як роль поверхневого стоку менш суттєва.

До основних причин прискореної ерозії відносять інтенсивне втручання людини у природні процеси. Зокрема, неконтрольоване вирубування лісів суттєво посилює руйнування ґрунтів. Лісові насадження відіграють провідну роль у захисті ґрунту: коренева система дерев формує густу мережу, яка утримує талу та дощову воду, забезпечує поступове її проникнення в ґрунтовий профіль і підтримує оптимальну

вологість. Завдяки здатності накопичувати вологу ліс можна порівняти з природним водосховищем. На безлісних ділянках волога випаровується у 2–3 рази швидше, а відкритий ґрунт зазнає надмірного перегрівання, що призводить до загибелі мікроорганізмів, ґрунтових тварин і рослин, які беруть участь у гумусоутворенні та трансформації органіно-мінеральних сполук. Зменшення площі лісових екосистем також змінює локальний клімат у бік посушливості, що додатково сприяє висушуванню ґрунтів і прискорює розвиток ерозійних процесів.

2. Розорювання луків. Трав'яниста рослинність характеризується добре розвинутою кореневою системою, яка формує щільну дернину на поверхні ґрунту. Саме вона виконує основну ґрунтозахисну функцію. При розорюванні луків ця природна захисна оболонка руйнується, що сприяє розвитку ерозійних процесів.

3. Надмірне випасання худоби. Негативний вплив перевипасання проявляється у зменшенні площі рослинного покриву, оскільки рослини знищуються швидше, ніж встигає завершитися їх природний цикл відновлення. Окрім прямого поїдання рослин, худоба вибиває копитами ґрунт, порушуючи його структуру та перетворюючи його на пиловатий. З часом рослинність зникає, і на цих ділянках активно формується ерозійна мережа, зокрема балки. Уздовж шляхів перегону та поблизу загонів утворюються дрібні заглиблення, де накопичується вода, що прискорює ерозійні процеси. Вибіркове поїдання тваринами найбільш цінних кормових рослин призводить до збіднення флористичного складу: переважають малоприсдатні або взагалі непридатні для годівлі види. У першу чергу зникають багаторічні рослини з потужною кореневою системою, тоді як однорічні, що залишаються, через слабший розвиток коренів забезпечують значно гірший захист ґрунту від руйнування. У посушливих степах і напівпустелях із легкими за механічним складом ґрунтами надмірне випасання спричинює руйнування дернини та розвиток інтенсивної вітрової ерозії.

4. Порушення правил землеробства. Відсутність науково обґрунтованої сівозміни негативно впливає на стан ґрунту. Тривале вирощування однієї культури на одному полі призводить до того, що значну частину року ґрунт залишається відкритим і незахищеним від впливу сонячної радіації та вітрових потоків. При цьому зменшується запас поживних елементів, необхідних для рослин. Для їх компенсації засто-

совують мінеральні добрива, однак органічна речовина, що забезпечує формування структури та збереження властивостей ґрунту, не відновлюється. У результаті ґрунт виснажується, погіршуються його фізичні характеристики, що сприяє розвитку як водної, так і вітрової ерозії. Особливо небезпечним є поздовжнє розорювання схилів, навіть із незначним ухилом, адже воно провокує змивання верхнього шару ґрунту. Ерозійні втрати є незворотними: усе, що винесене водою чи вітром, назавжди втрачається для землеробства.

Сьогодні площа еродованих і ерозійно небезпечних земель в Україні перевищує 17 млн га. Часто на одній території одночасно проявляються різні типи ерозійних процесів. Так, на зрошуваних землях набули поширення площинний змив і намив ґрунту, а також розмиви поливних борозен. Найбільш ураженими регіонами є Луганська, Вінницька, Дніпропетровська та Одеська області, де частка змитих ґрунтів становить 53–66 % від площі орних земель.

5. Оцінка ерозійно небезпечних ділянок ґрунтового покриву

Використання супутникових знімків для дослідження ерозії ґрунтів має значні переваги перед традиційними методами. Вони забезпечують швидкий, економічний та об'єктивний аналіз великих територій, що є майже неможливим при польових дослідженнях. Супутникові знімки дозволяють одночасно аналізувати величезні території, від регіонального до глобального масштабу. Це дає змогу виявляти ерозійні процеси, які можуть бути непомітними на локальному рівні, та оцінювати їхній вплив у масштабах цілих басейнів чи адміністративних одиниць.

Супутники надають можливість отримувати знімки з регулярними інтервалами (від кількох днів до тижнів). Це дозволяє відстежувати динаміку ерозійних процесів та їхні зміни протягом певного періоду, що є критично важливим для оцінки ефективності ґрунтозахисних заходів. На відміну від польових вимірювань, які можуть залежати від людського фактора, супутникові дані є об'єктивними. Вони надають кількісні показники, такі як вегетаційні індекси (NDVI), що корелюють зі станом рослинного покриву та, відповідно, зі ступенем ерозії. Супутникові знімки в різних спектральних діапазонах (наприклад, ближньому інфрачервоному) дозволяють виявити ознаки деградації ґрунту, які можуть бути непомітні для неозброєного ока. Наприклад,

оголення ґрунту, зниження його вологості або зміна складу можуть бути ефективно ідентифіковані.

Дані дистанційного зондування легко інтегруються з геоінформаційними системами (ГІС). Це дозволяє комбінувати їх з іншими геопросторовими даними (наприклад, картами рельєфу, ґрунтовими картами, кліматичними даними) для проведення комплексного аналізу та створення деталізованих карт ерозійної небезпеки.

Визначення індексу *ER* для території Запорізької області дасть можливість відстежити просторовий розподіл інтенсивності ерозійних процесів ґрунтів, зокрема виділити території з найбільшою потенційною ерозійною небезпекою.

Розрахунок інтенсивності ерозійного розчленування території проводиться за формулою (1) [12]:

$$ER = \frac{\Delta H N l}{P^2}, \quad (1)$$

де Nl/P – горизонтальне розчленування рельєфу,

N – кількість пікселів ізоліній у ковзному вікні,

l – довжина пікселя.

Для дослідження ми використовували цифрову модель рельєфу (ЦМР) України. Ця модель була створена на основі даних, зібраних під час космічної місії Shuttle Radar Topographic Mission (SRTM). У 1990-х роках спеціальна радарна система, встановлена на борту космічного корабля багаторазового використання Shuttle, провела топографічну зйомку майже всієї земної суші, за винятком найвіддаленіших полярних регіонів.

На рис. 1 наведено розподіл значень індексу інтенсивності ерозійного розчленування рельєфу (*ER*).

Для подальших досліджень було розраховано показники усередненої кількості опадів (*R*) та індексу рослинності *NDVI* (рис. 2-3).

Одним із провідних чинників ерозії є кліматичні умови, зокрема опади. Щоб уточнити індекс ерозійної небезпеки, до аналізу був доданий показник усередненої кількості опадів (*R*), зібраний гідрометеорологічними станціями за 30 років (рис. 2). Як і очікувалося, найбільша середньорічна кількість опадів припадає на східну частину регіону.

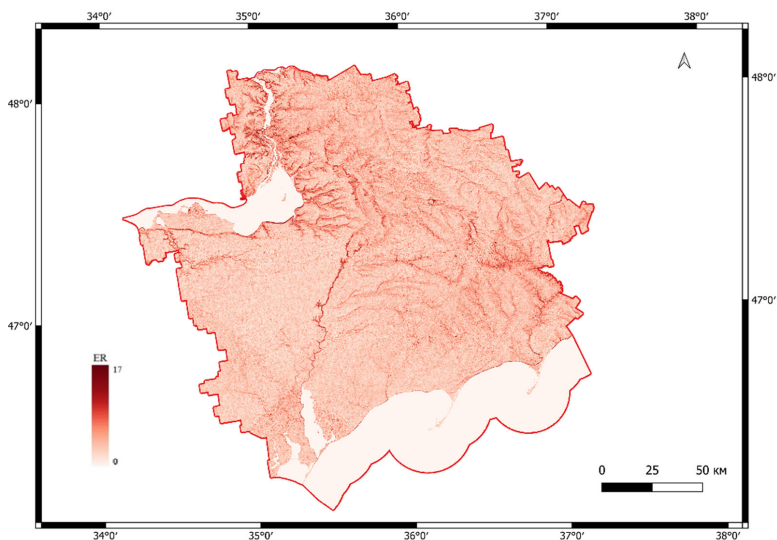


Рис. 1. Карта розподілу індексу ER Запорізької області

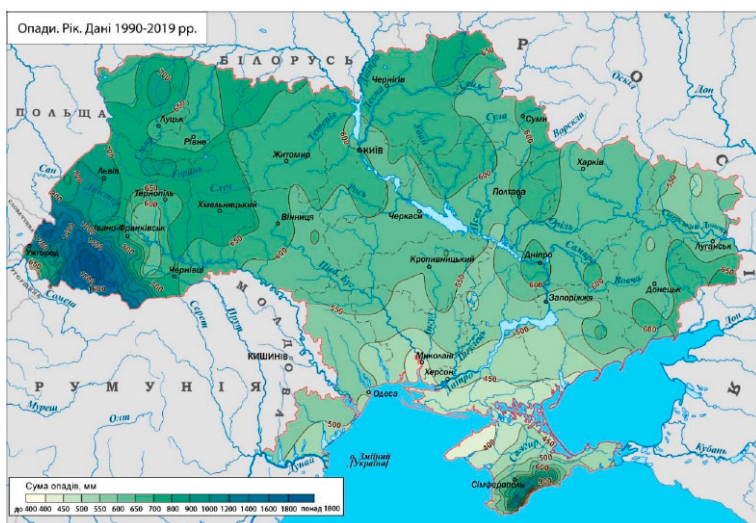


Рис. 2. Річна кількість опадів (мм) із врахуванням аеродинамічної поправки за методологією Голубєва, 1990–2019 рр. [14]

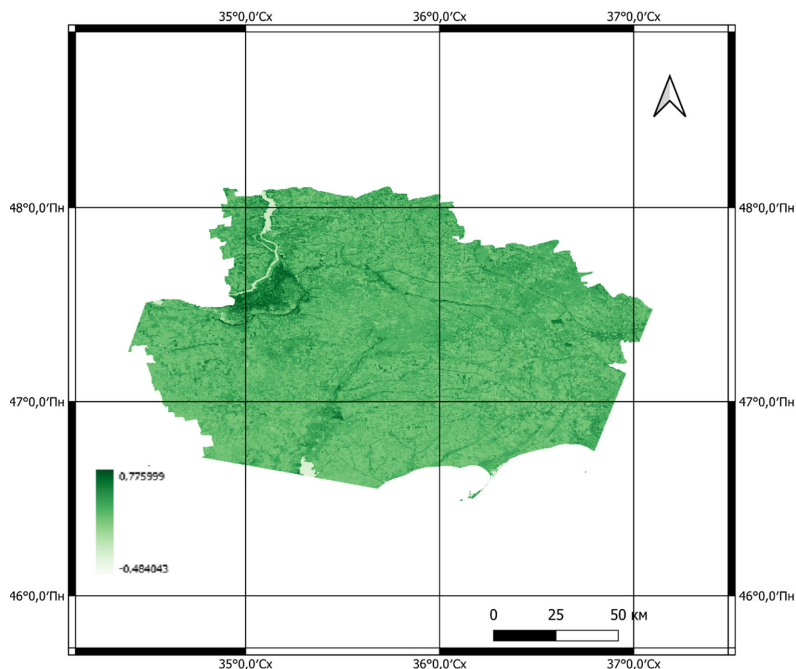


Рис. 3. Карта розподілу сумарного індексу NDVI

Запорізька область знаходиться у зоні помірно-континентального клімату. Він характеризується спекотним і сухим літом, м'якою, мало-сніжною зимою. Кількість опадів коливається в межах 350-450 мм на рік. Більша їх частина випадає у весняно-літній період, часто у вигляді злив, які сприяють водній ерозії ґрунтів. Недостатня кількість опадів та високі температури зумовлюють високий ризик деградації земель. Територія області переважно рівнинна, що є сприятливим фактором для розвитку сільського господарства, але водночас робить її вразливою до ерозійних процесів. На півночі області розташовані відроги Придніпровської височини, а на півдні – Приазовська низовина [15].

Враховуючи глобальні та регіональні кліматичні зміни, можливе зменшення кількості опадів. Тому у майбутньому вплив опадів на розвиток ерозійних процесів буде тільки зменшуватись.

6. Протиерозійні заходи

Ерозія ґрунтів є одним із найнебезпечніших деградаційних процесів, що призводить до втрати родючості, зниження продуктивності агроландшафтів, замулення водойм та погіршення екологічного стану територій. Для уповільнення або повного припинення ерозійних процесів застосовується комплекс агротехнічних, лісомеліоративних, гідротехнічних та організаційно-господарських заходів, спрямованих на захист ґрунтового покриву.

Агротехнічні протиерозійні заходи спрямовані на забезпечення оптимальної структури ґрунту, зменшення швидкості поверхневого стоку та підвищення вологонакопичення.

Агротехнічні заходи є одним із найважливіших елементів системи боротьби з ерозією, оскільки вони безпосередньо впливають на структуру ґрунту, інфільтрацію води, щільність рослинного покриву та характер обробітку земель. Правильно організована система агротехнічних прийомів здатна суттєво знизити інтенсивність як водної, так і вітрової ерозії.

Контурне землеробство. Поля обробляються вздовж горизонталей місцевості, а не вниз по схилу. Це: зменшує швидкість поверхневого стоку; сприяє кращому накопиченню вологи; знижує змивання ґрунтових часток.

Контурне землеробство особливо ефективне на схилах зі середнім ерозійним ризиком.

Поперечно-схилувий обробіток ґрунту – оранка, культивация, борошування та сівба виконуються перпендикулярно ухилу, що: збільшує шорсткість поверхні ґрунту; зменшує швидкість стоку та еродованість; утримує талу й дощову воду.

Протиерозійні сівозміни – це раціональне чергування культур, що сприяє відновленню структури ґрунту. Основні принципи: зменшення частки просапних культур на схилах (кукурудзи, соняшнику, картоплі); введення у сівозміну багаторічних трав (люцерна, конюшина); чергу-

вання культур із різною кореневою системою; послідовне чергування культур із високим і низьким ризиком ерозії.

Посів багаторічних трав та сидератів: захищають поверхню ґрунту від розмивання; сприяють розвитку міцної кореневої системи; підвищують вміст органічної речовини; відновлюють структуру та водостійкість ґрунтових агрегатів. Сидерація (гірчиця, фацелія, жито) знижує ризик ерозії восени та ранньою весною.

Оптимізація обробітку ґрунту: мінімізує руйнування агрегатів; зберігає рослинні рештки на поверхні; зменшує вітрову і водну ерозію.

Мульчувальний обробіток: поверхня вкривається подрібненими рослинними рештками; знижується випаровування, перегрів і розмивання ґрунту; підвищується біологічна активність.

Смугове розпушування створює чергування оброблених і необроблених смуг поперек схилу.

Обмеження розорювання крутих схилів. На схилах понад 7–10° рекомендується: переводити землі у кормові угіддя або під заліснення; уникати просапних культур; застосовувати мінімальний обробіток.

Підвищення ґрунтової родючості: підтримання високого вмісту органічної речовини: покращує структуру ґрунту; підвищує водостійкість агрегатів; знижує ризик руйнування під впливом зливових потоків. Методи: внесення органічних добрив, компостів, сидерація, біопрепарати.

Утримання післяжнивних решток на поверхні: захищають від ударів дощових крапель; підвищують інфільтрацію води; зменшують випаровування; утворюють мульчу, що стримує ерозію. Це основа консерваційного землеробства.

Смугове землеробство: чергування смуг різних культур; чергування оброблених і необроблених смуг; розміщення смуг упоперек схилу. Це зменшує силу поверхневого стоку та стабілізує поверхню ґрунту.

Агротехнічні протиерозійні заходи формують базову систему захисту ґрунтів від деградації. Їх ефективність значно зростає при комплексному впровадженні, з урахуванням рельєфу, кліматичних умов, гранулометричного складу ґрунту та характеру землекористування.

Лісомеліоративні заходи спрямовані на стабілізацію ґрунтів завдяки рослинному покриву та кореневій системі. Лісомеліорація є одним із ключових напрямів відновлення деградованих земель, адже

деревно-чагарникова рослинність суттєво впливає на водний, повітряний і тепловий режими території, сприяє стабілізації рельєфу, акумуляції органічної речовини та формуванню стійких ґрунтових структур. Лісові насадження виконують функції біологічних бар'єрів, гідрологічних регуляторів, фільтрів для поверхневого стоку та є важливою частиною комплексних протиерозійних та природоохоронних систем.

Полезахисні лісосмуги формують багаторусний біогеоценоз уздовж меж сільськогосподарських полів і знижують швидкість вітру у 3–5 разів, що попереджує дефляцію ґрунтів. Основними функціями є: зменшення дефляції та ерозійних втрат ґрунту; підвищення вологості повітря і ґрунту, зниження випаровування; створення мікроклімату, що підвищує урожайність культур на 10–25%; зменшення снігопереносу, рівномірне розподілення снігового покриву; сумарна затримка до 20–30 мм опадів у вигляді талих вод.

Типовий склад деревних порід: робінія звичайна, клен ясенелисний, сосна звичайна, тополя, дуб звичайний; чагарники: глід однаточковий, бирючина звичайна, та ін.

Водорегулювальні та схиліві лісосмуги розміщуються на схилах поперек напрямку стоку або уздовж горизонталей. Вони забезпечують: гальмування поверхневих вод, зменшення їх кінетичної енергії; запобігання утворенню лінійної ерозії (борозен, промоїн); акумуляція води в кореневмісному шарі; зміцнення схилів та формування стабільних ґрунтових агрегатів.

Ерозійні форми рельєфу вимагають біоінженерних рішень, спрямованих на зупинку подальшого руйнування ґрунту. Заліснення активних ярів сприяє інтенсивному росту у довжину та глибину. Основні заходи: посадка дерев із потужною стрижневою або розгалуженою кореневою системою (акація, гледичія, дуб); закріплення схилів чагарниками; посів багаторічних трав; створення дернового покриву, що швидко стабілізує поверхню.

Заліснення стабілізованих ярів ґрунтується на ґрунтовідновленні й формуванні ландшафтних угруповань. Вибирають породи: дуб, сосна, клен татарський, липа, а також кущі – глід, дерен, шипшина.

Лісонасадження на піщаних і супіщаних ґрунтах найбільш вразливі до вітрової ерозії. Ефективність полягає у: створенні стійких хвойних культур (сосна звичайна); закріплення пісків чагарниками (тамарикс,

обліпіха, маслинка вузьколиста); комбіновані насадження «дерева + чагарники + злакові трави»; гідропосів трав із використанням мульчувальних біоматів. Біогеоценотичний ефект: формування гумусового горизонту; зменшення рухомості пісків; стабілізація регіонального рівня ґрунтових вод.

У багатьох регіонах України лісосмуги втрачають продуктивність через старіння або неконтрольовані вирубки. Основні операції: доповнення молодими деревами; формування багаторусної структури (високі, середні, низькі яруси); видалення сухостою та хворих дерев; омолоджувальні рубки; підсадка тіньовитривалих кущів для ущільнення підліску.

У зонах, де деревні породи не приживаються (південний степ, посушливі схили), ефективнішим є травостій. Його переваги: потужна дернинна коренева система; формування щільного покриву, що не дозволяє ерозії розвиватись; біоіндикаційні та фітомеліоративні властивості; відновлення структури ґрунту та збільшення вмісту гумусу. Основні види трав: костриця, тонконіг, пирій, стоколос.

Прибережно-захисні лісові смуги формуються вздовж річок, озер, водосховищ, каналів для запобігання береговій ерозії. Їх функція полягає у: укріплення берегів завдяки кореневій системі дерев і кущів; фільтрація зливового і талі вод стоку; затримання завислих часток, пестицидів, нітратів; формування стабільної прибережної екосистеми. Породи: вільха, тополя, верба, крушина, осика, лоза.

Біотехнічні та інженерно-біологічні методи геотекстиль, кокосові мати, біомати; георешітки для укріплення крутих схилів; хмизові тини та загати; гідропосів із закріплювальними емульсіями; терасування схилів. Це дозволяє швидко стабілізувати ділянку до формування стійкої рослинності.

Інтеграція лісомеліорації в систему комплексного протиерозійного захисту. Найвищу ефективність лісомеліоративні заходи дають у комплексі з: агротехнічними протиерозійними заходами (контурна оранка, мульчування, сидерати); гідротехнічними спорудами (водовідвідні канали, вальсери, перепади); геопросторовим аналізом (GIS, моделі рельєфу); дистанційним моніторингом (ДЗЗ, дрони); землеупорядкованими рішеннями щодо режимів використання земель. Комплексний підхід дозволяє зменшити обсяг ерозійних втрат на 70–90%.

Лісомеліоративні заходи є основним інструментом довгострокового відновлення еродованих ґрунтів. Вони забезпечують стабілізацію схилів, зменшення швидкості стоку, закріплення поверхні, відновлення родючості та формування стійких агроландшафтів. Правильний підбір порід, урахування місцевих ґрунтово-кліматичних умов і комплексний підхід забезпечують максимальну ефективність лісомеліорації

Гідротехнічні протиерозійні заходи спрямовані на штучне регулювання поверхневого стоку та попередження руйнування схилів. До них належать: терасування схилів – створення терас, які зменшують швидкість стоку та ерозійний потенціал; будівництво водовідвідних каналів, нагірних канав і валів для безпечного відведення стоку; облаштування перепадів, земляних загат, порогів у балках і ярах для уповільнення водного потоку; ставки-ємності та водорегулювальні споруди – для акумуляції талих і зливових вод; підпірні стінки, берегоукріплення – у зонах розмиву берегів річок і водойм; організаційно-господарські заходи – це управлінські та планувальні рішення, що сприяють раціональному використанню земель; зонування територій за ступенем ерозійної небезпеки й обмеження використання земель з високим ризиком; заборона або обмеження оранки крутих схилів, переведення їх у пасовища або лісові ділянки; регулювання навантаження на пасовища, недопущення перевипасання; контроль за проведенням ґрунтоохоронних заходів у господарствах; планування землекористування на основі даних ДЗЗ та ГІС (картування ерозійних процесів, моделі стоку, цифрові моделі рельєфу); біотехнічні заходи спрямовані на використання рослинності та біологічних матеріалів для стабілізації ґрунтів; посів трав на еродованих землях (злаки, бобові багаторічні); мульчування біоматеріалами (солома, тирса, біомат); зміцнення схилів біоматами, кокосовими сітками, геотекстилем.

Застосування супутникового моніторингу для протиерозійних заходів. Сучасний підхід включає використання ДЗЗ даних для: виявлення та картування ерозійних форм (ярів, балок, змивів); оцінювання інтенсивності ерозії за NDVI, NBR, RUSLE-моделями; планування протиерозійних заходів з урахуванням рельєфу (ЦМР); моніторинг ефективності впроваджених заходів.

Протиерозійні заходи повинні реалізовуватися комплексно, з урахуванням природних умов території, типу ерозії та ступеня її розвитку.

Ефективний захист ґрунтів можливий лише при поєднанні агротехнічних, лісомеліоративних, гідротехнічних та управлінських рішень, а також використанні сучасних інструментів супутникового і геоінформаційного моніторингу.

7. Висновки

Проблема деградації ґрунтового покриву через ерозійні процеси є гостро актуальною для Запорізької області, що підтверджується результатами геопросторового аналізу.

Застосування даних дистанційного зондування Землі (ДЗЗ), зокрема мультиспектральних знімків Sentinel-2, Landsat 8/9 та цифрової моделі рельєфу (SRTM), у поєднанні з ГІС-технологіями довело свою високу ефективність для оперативного та широкомасштабного виявлення і оцінки ерозійної небезпеки.

В результаті моделювання було картографовано та класифіковано ерозійно небезпечні ділянки ґрунтового покриву. Визначено, що значна частина сільськогосподарських угідь області має середній та високий ризик водної та вітрової ерозії.

Встановлено, що фактор рельєфу є одним із домінуючих чинників у поширенні ерозійних процесів. Ділянки з найбільшою крутизною та довжиною схилів, як правило, відповідають зонам найвищої ерозійної небезпеки.

Підтверджено, що щільність рослинного покриву (визначений через NDVI) є ключовим захисним механізмом. Ділянки з низькими значеннями NDVI (оголений ґрунт або рідка рослинність) у найбільш критичні періоди року корелюють із зонами максимальних потенційних втрат ґрунту.

Згідно зі створеною картою ерозійної небезпеки, найбільш вразливі ділянки, що вимагають негайного впровадження протиерозійних заходів, локалізуються на схилах балок та в прируслових зонах малих річок. Локалізація ерозійної небезпеки в цих зонах вимагає пріоритетного та цільового застосування протиерозійних заходів. Без втручання, ці ділянки стануть джерелами інтенсивної ерозії, що поширюватиметься на сусідні, менш пошкоджені території, і призведе до замулення русел річок та ставків. Це робить їх критично важливими

зонами для впровадження таких заходів, як контурне землеробство, залуження, терасування та створення водорегулюючих валів.

Отримана карта ерозійної небезпеки та розроблена ГІС-методика можуть слугувати науково обґрунтованою основою для: розробки регіональної системи протиерозійного захисту земель; прийняття рішень органами місцевого самоврядування та агропідприємствами щодо раціонального планування землекористування.

Список літератури:

1. Лялько В. І., Єлістратова Л. О., Апостолов О. А., Ходоровський А. Я., Чехній В. М. Експрес-оцінка ерозійно небезпечних ділянок ґрунтового покриву на території України з використанням даних дистанційного зондування Землі з врахуванням кліматичних факторів та рослинності. *Допов. Нац. акад. наук Укр.* 2018. № 3. С. 87–94.
2. Попов М. А., Станкевич С. А., Козлова А. А. Дистанционная оценка риска деградации земель с использованием космических снимков и геопространственного моделирования. *Допов. Нац. акад. наук Укр.* 2012. № 6. С. 100–104.
3. Горбатюк В. М., Клименко К. В. Організаційно-технологічні особливості здійснення моніторингу земель на регіональному рівні. *Геодезія, картографія і аерофотознімання*. 2007. Вип. 69. С. 150–156.
4. Трускавецький С. Р., Вяткін К. В. Земельна інформаційна система як геоінформаційно-технологічний інструмент моніторингу ґрунтів. *Агрохімія і ґрунтознавство*. 2015. Вип. 82. С. 14–19.
5. Зацерковний В. І. Застосування геоінформаційних систем у задачах ефективного землекористування. *Наук. пр. Техногенна безпека. Радіобіологія*. 2015. Том 261, вип. 249. С. 14–21.
6. Казаченко Л. М., Казаченко Д. А. ГІС-технології при виявленні деградаційних процесів ґрунтового покриву лісостепової частини Харківської області. *Вісн. Харків. нац. техн. ун-ту сільського господарства ім. Петра Василенка*. 2015. Вип. 156. С. 231–236.
7. Трускавецький С. Р., Вяткін К. В., Шерстюк О. І. Моніторинг ерозійних процесів за даними космічного знімання. *Агроекол. журн.* 2015. № 3. С. 60–65.
8. Швець О. Визначення потенційної небезпеки прояву ерозійних процесів за допомогою ГІС-технологій. *Сучасні досягнення геодез. науки та виробництва*. 2014. Вип. І. С. 137–140.
9. Светличный А. А. Пространственное геоинформационное моделирование и прогноз водной эрозии почв. *Пробл. непрерывной географ. освіти і картографії*. 2013. Вип. 17. С. 44–47.
10. Медведєв В. В., Лактіонова Т. М., Греков Л. Д. Типологія і оцінки небезпечних явищ у ґрунтовому покриві України. *Ґрунтознавство*. 2004. Том 5, № 3–4. С. 13–23.

11. Палиенко В. П., Спица Р. А., Чеботарева Л. Е. Интегральная оценка интенсивности эрозийных процессов в речных бассейнах Украины. *Теоретические и прикладные проблемы современной географии: Материалы междунар. науч. конф. памяти академика Г.И. Швевса*, 3-5 июня 2009 г. Одесса : БМВ, 2009. С. 164–166.

12. Лялько В. І., Єлістратова Л. О., Апостолов О. А., Чехній В. М. Аналіз ґрунтово-ерозійних процесів в Україні на основі застосування даних дистанційного зондування Землі. *Вісн. НАН України*. 2017. № 10. С. 34–41.

13. Сайт геологічної служби США. URL: <https://earthexplorer.usgs.gov>

14. Осипов В. В., Бончковський А. С., Орещенко А. В., Ошурок Д. О., Осадча Н. М. Обчислення кількості опадів на українських метеостанціях із врахуванням впливу вітру. *Вісник Харківського національного університету імені В. Н. Каразіна, серія «Геологія. Географія. Екологія»*. 2021. Вип. 55. С. 204–215. DOI: <https://doi.org/10.26565/2410-7360-2021-55-15>

15. Фізична географія Запорізької області: Хрестоматія / Відп. ред. Л. М. Даценко. Мелітополь : Вид-во МДПУ ім. Б. Хмельницького, 2014. 200 с.

References:

1. Lyalko V.I., Elistratova L.O., Apostolov O.A., Khodorovsky A.Ya., Czechniy V.M. (2018) Express-evaluation of potentially erosive soils on the territory of Ukraine, by using the remote sensing data with consideration of climatic factors and vegetation. *Dopov. Nac. akad. nauk Ukr.* № 3. 87–94. (in Ukrainian)

2. Popov, M. A., Stankievich, S. A. & Kozlova, A. A. (2012). Remote risk assessment of land degradation using satellite images and geospatial modeling. *Dopov. Nac. akad. nauk Ukr.*, No. 6, pp. 100–104. (in Russian).

3. Gorbatyuk, V. M. & Klimenko, K. V. (2007). Organizational-technological peculiarities of monitoring of land at the regional level. *Heodesziia, kartohrafiia i aeroznimannia*, 69, pp. 150–156. (in Ukrainian)

4. Truskavetsky, S. R. & Vyatkin, K. V. (2015). Land information system as a geoinformation and technology tool for soil monitoring. *Agrochemistry and soil science*. Iss. 82, pp. 14–19. (in Ukrainian)

5. Zatserkovnyi V. I. (2015). The use of geographic information systems in tasks effective land use. *Naukovi pratsi. Tekhnogenna bezpeka. Radiobiologiya*, 261, Iss. 249, pp. 14–21. (in Ukrainian)

6. Kazachenko, L. & Kazachenko, D. (2015). GIS-technologies in detecting degradation processes of the soil cover of the forest-steppe part of the Kharkiv region. *Visnyk Kharkivskoho nacionalnoho tekhnohoho universytetu silskoho hospodarstva imeni Petra Vasylenka*, 156, pp. 231–236. (in Ukrainian)

7. Truskavetskiy, S., Vyatkin, K. & Sherstiuk, A. (2015). Monitoring of erosion processes according to the data of satellite observations. *Agroecol. j.*, No. 3, pp. 60–65. (in Ukrainian)

8. Shvets, O. (2014). Determination of the potential danger of manifestation erosion using GIS technology. *Suchasni dosiahnennia heodezychnoi nauky ta vyrobnytstva*, Iss. 1, pp. 137–140. (in Ukrainian)

9. Svetlichnyi, A. A. (2013). Spatial geoinformational modeling and forecast of soil water erosion. *Problemy bezperevnoyi heohrafichnoyi osvity ta kartohrafiyi*, Iss. 17, pp. 44–47. (in Russian)
10. Medvedev, V. V., Laktionova, T. M. & Grekov, L. D. (2004). The typology and estimation of dangerous phenomena in a soil cover of Ukraine. *Gruntoznavstvo*, Vol. 5, No. 3-4, pp. 13–23. (in Ukrainian)
11. Palienko, V. P., Spitsa, R. A. & Chebotareva, L. E. (2009, June). Integral estimation of intensity of erosion processes in river basins of Ukraine. Proceeding of the International Scientific Conference memory of academician G. I. Schwebs Theoretical and applied problems of modern geography (pp. 164–166). Odessa: VMV. (in Russian)
12. Lyalko, V. I., Elistratova, L. A., Apostolov, A. A. & Chekhniy, V. M. (2017). Analysis of soil erosion processes in Ukraine on the basis of remote sensing of the Earth. *Visn. Nac. Akad. Nauk Ukr.*, No. 10, pp. 34–41. (in Ukrainian)
13. USGS. URL: <https://earthexplorer.usgs.gov>
14. Osypov V. V., Bonchkovskyi A. S., Oreshchenko A. V., Oshurok D. O., Osadcha N. M. (2021). Quantifying wind-induced undercatch in the precipitation measurements at Ukrainian weather stations. *Visnyk of V. N. Karazin Kharkiv National University, series "Geology. Geography. Ecology"*, (55), 204–215. DOI: <https://doi.org/10.26565/2410-7360-2021-55-15> (in Ukrainian)
15. Physical Geography of Zaporizhzhia Oblast: Textbook / Ed. L.M. Datsenko. Melitopol. 2014.