

МЕЛІОРАЦІЯ І РОДЮЧІСТЬ ҐРУНТІВ

MELIORATION AND SOIL FERTILITY

УДК 004:551.4:631.459:528.7(477.43/.44)

DOI <https://doi.org/10.32782/2226-0099.2026.148.2.36>

ВИКОРИСТАННЯ ЦИФРОВИХ МОДЕЛЕЙ РЕЛЬЄФУ ДЛЯ КІЛЬКІСНОГО ОЦІНЮВАННЯ ЕРОЗІЇ ФОТОГРАМЕТРИЧНИМИ ЗАСОБАМИ НА ПРИКЛАДІ ПОДІЛЛЯ

Кушнірук Т.М. – к.с.-г.н., доцент,

доцент кафедри садово-паркового господарства, геодезії і землеустрою,

Заклад вищої освіти «Подільський державний університет»

orcid.org/0000-0002-3983-6070

Додурич В.В. – асистент кафедри садово-паркового господарства,
геодезії і землеустрою,

Заклад вищої освіти «Подільський державний університет»

orcid.org/0009-0001-8399-771X

У статті представлено результати розробки та впровадження комплексних методичних підходів до фіксування змивних процесів і адаптації існуючих моделей водної ерозії. В основу дослідження покладено концепцію багаторівневого моніторингу (детального, локального та регіонального рівнів), що реалізується через синергію сучасних ГІС-технологій, методів дистанційного зондування Землі та прецизійного мікроморфологічного аналізу структури ґрунтового покриву.

Застосований комплексний підхід дозволив інтегрувати різномасштабні дані в єдину аналітичну систему. Зокрема, на мікрорівні використано растрову електронну мікроскопію (РЕМ), яка дала змогу детально проаналізувати мікроструктуру пор та розрахувати ентропійні характеристики протиерозійної стійкості лесових ґрунтів. Це дозволяє оцінити внутрішню стабільність ґрунтових агрегатів перед зовнішнім механічним впливом опадів. На локальному рівні застосовано короткобазисну фотограмметрію, за допомогою якої створено високоточні 3D-моделі (TIN та GRID) на елементарних стокових майданчиках (ЕСМ). Це забезпечило візуалізацію мікрорельєфу та розрахунок об'ємів змитого ґрунту з точністю до міліметрів.

На регіональному рівні задіяно ГІС-моделювання та дистанційне зондування Землі (ДЗЗ) для побудови цифрових моделей рельєфу (ЦМР) та проведення ерозійного районування територій. Вперше для специфічних фізико-географічних умов Поділля запропоновано використання ентропійних показників мікроструктури ґрунту як фундаментального індикатора його стійкості до антропогенної деградації. Це дозволило уточнити коефіцієнт еродованості в існуючих прогнозних моделях (таких як USLE/RUSLE), роблячи їх більш адаптивними до місцевих умов.

Удосконалено методику оперативної оцінки змиву через інтеграцію мікроморфометричних параметрів ґрунту з мезоформами рельєфу. Подальшого розвитку набули методи



© Кушнірук Т.М., Додурич В.В., 2026

Стаття поширюється на умовах ліцензії відкритого доступу CC BY 4.0

картографування ерозійно-трансформованих земель із використанням методів пластики рельєфу та анаморфованих зображень, що забезпечує високу наочність зон потенційного ризику та дозволяє ідентифікувати приховані вогнища ерозії.

Отримані результати мають безпосереднє практичне значення: вони дозволяють здійснювати точний довгостроковий прогноз деградації сільськогосподарських угідь, оптимізувати мережу пунктів державного моніторингу (зокрема УЗГ та КРГ) та приймати обґрунтовані управлінські рішення при проєктуванні сучасних контурно-меліоративних систем землеробства. Впровадження запропонованих підходів сприятиме збереженню родючості ґрунтів та забезпеченню сталого землекористування в регіоні.

Ключові слова: цифрова модель рельєфу, засоби фотограмметрії, деградація, агроландшафти, дистанційне зондування, ерозія ґрунтів, водна ерозія, аерофотознімки, опорні точки, програмне забезпечення, багаторівневий моніторинг, методи картографування, топографічні карти.

Kushniruk T.M., Dodurych V.V. Use of digital relieve models for quantitative assessment of erosion using photogrammetric means on the example of Podillia

The article presents the results of the development and implementation of complex methodological approaches to recording washout processes and adapting existing water erosion models. The study is based on the concept of multi-level monitoring (detailed, local and regional levels), which is implemented through the synergy of modern GIS technologies, remote sensing methods of the Earth and precision micromorphological analysis of the structure of the soil cover. The applied complex approach allowed integrating data of different scales into a single analytical system. In particular, at the micro level, scanning electron microscopy (SEM) was used, which made it possible to analyze in detail the microstructure of pores and calculate the entropic characteristics of the anti-erosion resistance of loess soils. This allows assessing the internal stability of soil aggregates before the external mechanical impact of precipitation. At the local level, short-base photogrammetry was used, with the help of which high-precision 3D models (TIN and GRID) were created on elementary drainage areas (ESM). This provided visualization of microrelief and calculation of volumes of washed soil with an accuracy of millimeters.

At the regional level, GIS modeling and remote sensing of the Earth (RS) were used to build digital relief models (DRM) and conduct erosion zoning of territories. For the first time, for the specific physical and geographical conditions of Podillia, the use of entropic indicators of soil microstructure as a fundamental indicator of its resistance to anthropogenic degradation was proposed. This allowed to refine the erosion coefficient in existing predictive models (such as USLE/RUSLE), making them more adaptive to local conditions.

The methodology for operational assessment of washout was improved through the integration of micromorphometric parameters of soil with relief mesoforms. Methods for mapping eroded and transformed lands using relief plasticity and anamorphic imaging methods have been further developed, which provides high visibility of potential risk zones and allows identifying hidden erosion foci.

The results obtained have direct practical significance: they allow for accurate long-term forecasting of agricultural land degradation, optimize the network of state monitoring points (in particular, UZG and KRG), and make informed management decisions when designing modern contour and land reclamation systems for agriculture. The implementation of the proposed approaches will contribute to the preservation of soil fertility and ensuring sustainable land use in the region.

Key words: digital elevation model (DEM), photogrammetric tools, degradation, agricultural landscapes, remote sensing, soil erosion, water erosion, aerial imagery, ground control points (GCPs), software, multi-level monitoring, mapping methods, topographic maps.

Постановка проблеми. Наразі вивчення ерозійних процесів на сільськогосподарських угіддях є ключовим етапом моніторингу в багатьох наукових галузях. Це зумовлює існування різноманітних теоретичних та практичних підходів, основними з яких є:

- Дослідження довкілля на основі дистанційного зондування та прикладної фотограмметрії.
- Формування екологічно збалансованих ландшафтів в умовах прояву ерозії.

– Отримання достовірних вхідних даних та надійна інтерпретація результатів щодо мінерального складу ґрунтів за допомогою рентгенівського аналізу.

Окрім моделювання, важливим є розробка алгоритму спостережень, що мінімізує еколого-економічні витрати для середніх та малих фермерських господарств, не порушуючи при цьому сільськогосподарське виробництво. Практична реалізація дослідження властивостей ґрунту на такому рівні можлива за допомогою методів прикладної фотограмметрії (короткобазисна фотограмметрія, РЕМ-мікроскопія) та тематичної картографії (карти пластики та анаморфованого зображення). Це дозволить інтегрувати запропоновані методи як складові елементи ієрархічної структури моніторингу.[1] Розглянемо можливість застосування цих методів для спостереження за ерозійно небезпечними територіями.

Аналіз останніх досліджень. Сучасний етап розвитку геології, ґрунтознавства та ерозієзнавства характеризується пріоритетністю досліджень, спрямованих на аналіз, класифікацію та моделювання земної поверхні. Морфометричні параметри рельєфу, зокрема карти горизонтальної, вертикальної, Гауссової та акумуляційної кривин, стали ключовим об'єктом прикладних геоморфологічних розвідок.

У науковому доробку за цим напрямом можна виділити кілька ключових векторів. Фундаментальний внесок у класифікацію морфометричних величин, їх математичний опис та розробку алгоритмів розрахунку зробив П. Шарий. Його методичні підходи стали базою для сучасного комп'ютерного моделювання рельєфу. Питання взаємозв'язку між морфометрією денної поверхні та гідрологічним режимом (зокрема вологістю ґрунтів) детально висвітлено у працях Мендель В. П. [5,6,7] Принципи кількісного аналізу морфології та використання даних супутникових систем для геоморфологічних досліджень розроблені у роботах Кривов'яз Є. В., Сиротенко С. А. [2] Ці дослідження формують технологічне підґрунтя для сучасних ГІС-рішень для моделювання ерозійних процесів. Світличний О. О. [8] запропонував методику детальної оцінки рельєфу шляхом зіставлення морфометричних карт із фактичним поширенням еродованих земель, що дозволяє отримувати точні кількісні показники ерозійно-акумулятивних процесів. Чорний С. В. [8] розробив методи ідентифікації структурних форм рельєфу, які при моделюванні змивних процесів забезпечують високу збіжність розрахункових даних із результатами натурних спостережень.

Попри значну кількість напрацювань, стрімкий розвиток цифрових моделей рельєфу (ЦМР) потребує подальшого вдосконалення методів автоматизованого аналізу для вирішення конкретних прикладних задач ерозієзнавства.

Метою досліджень було дослідження ієрархічного підходу ерозійних процесів на прикладі Подільської височини.

Методика досліджень. Для комплексного вивчення процесів водної ерозії та оптимізації витрат на сільськогосподарське моніторингове проектування було застосовано поєднання традиційних та сучасних дистанційних методів. Дослідження базувалося на синтезі таких наукових підходів, як геоморфологічний та картографічний методи, які застосовувалися для морфометричного аналізу рельєфу, виявлення ерозійно-небезпечних ділянок та створення серії тематичних карт кривин земної поверхні. [4]

Ґрунтознавчі польові дослідження, які використовувалися для верифікації ступеня еродованості ґрунтів та зіставлення натурних даних із розрахунковими моделями. Цифрова фотограмметрія та ДЗЗ, які забезпечили отримання високоточних даних про стан поверхні, що дозволило оперативно фіксувати зміни мікрорельєфу без значних економічних витрат на тривалі експедиції. Математичне моделювання,

за допомогою методів прикладної математики здійснено обробку систематичних спостережень, що дало змогу відтворити динаміку змиву ґрунту та розрахувати прогнозні об'єми ерозійних втрат.

Результати досліджень. Для проведення кількісного аналізу ерозії необхідні наступні вхідні дані:

- Аерофотознімки: Отримані за допомогою БпЛА (дронів), оснащених камерами високої роздільної здатності.
- Опорні точки (GPS): Координати наземних точок, виміряні за допомогою високоточного GNSS-обладнання (RTK/PPK), для точної прив'язки моделі до простору.
- Архівні карти: Для порівняння сучасного стану рельєфу з історичними даними.
- Програмне забезпечення: Pix4D, Agisoft Metashape (для обробки фотограмметрії), ArcGIS або QGIS (для аналізу ЦМР).

Процес оцінювання ерозії базується на методі DoD (DEM of Difference) – порівнянні двох моделей рельєфу, створених у різний час.

Етап I: Польові роботи та зйомка. Здійснюється серія вильотів БпЛА над досліджуваною ділянкою (яри, сільськогосподарські угіддя, берегові лінії). Важливо дотримуватися високого рівня перекриття кадрів (80-90%).

Етап II: Фотограмметрична обробка. Створення хмари точок та побудова щільної цифрової моделі: Вирівнювання зображень: Пошук спільних точок на сусідніх фото. Побудова щільної хмари точок (Dense Point Cloud): Генерація мільйонів точок з координатами X, Y, Z. Генерація ЦМР (DEM): Створення растрової поверхні, що представляє "чистий" рельєф (без рослинності та будівель).

Невід'ємною складовою вирішення проблеми раціонального використання та охорони земель в сучасних науково-практичних дослідженнях є застосування комплексних спостережень, [5] які дають змогу здійснювати оцінку існуючого, прогнозування стану земельних ресурсів, а також встановлення закономірностей поширення деградаційних процесів, зокрема, ерозійних.

Для отримання достовірної статистичної інформації про деградацію ґрунтів та адаптації прогнозних моделей водної ерозії (зокрема в межах Подільської височини), пропонуємо впровадження оперативних методів фіксування змивних процесів. [6]

Ефективність таких досліджень базується на чіткій ієрархічній структурі моніторингу довкілля, де основним критерієм є територіальне охоплення. Відповідно до цього, систему моніторингу пропонується доповнити трьома рівнями (табл. 1.1), кожен з яких інтегрує новітні методи аналізу ґрунтів та рельєфу. Пропонований підхід передбачає диференціацію досліджень за трьома векторами: Детальний рівень (РЕМ-мікроаналіз): (вивчення мікроструктури та фізико-хімічної стійкості ґрунту); Локальний рівень: (моніторинг конкретних ділянок схилів та малих водозборів); Регіональний рівень: (аналіз ерозійних процесів у масштабах ландшафтів Подільської височини).

Ключовим нововведенням на детальному рівні є використання растрової електронної мікроскопії (РЕМ). Це дозволяє встановити кореляцію між геометричними параметрами мікроструктури ґрунту та його протиерозійною стійкістю. Основні переваги та можливості методу:

- Дослідження шліфів зразків ґрунту дозволяє визначити фільтраційні властивості та архітектуру порогового простору.
- Використання показників ентропії для оцінки ступеня організації мікроструктури як індикатора стійкості ґрунту до розмиву.

– Опрацювання РЕМ-знімків дає змогу створювати об'ємні моделі мікротопографії поверхні без складного процесу виготовлення реплік (що є обов'язковим для просвічуючої мікроскопії).

– Визначення того, як саме змінюється конфігурація пор під впливом атмосферних опадів та особливостей морфометрії схилу.

Запропонована методика дозволяє не просто фіксувати факт змиву, а розуміти механіку руйнування ґрунтових агрегатів на мікрорівні, що є критично важливим для точного прогнозування ерозії.

Таблиця 1.1

Структура рівнів моніторингу ерозійних процесів

Рівень моніторингу	Об'єкт дослідження (Поділля)	Специфіка методів	Очікуваний результат
Детальний (РЕМ)	Лесові суглинки, сірі лісові ґрунти	Аналіз стійкості мікроагрегатів до перезволоження (ентропія пор)	Визначення критичного порогу розмиву лесової основи
Локальний	Схили каньйонів, балки, яружні системи	Використання безпілотників (UAV) для створення надточних 3D-моделей рельєфу	Мапи динаміки росту ярів та об'ємів винесеного ґрунту
Регіональний	Межірччя Дністра, Прута та Південного Бугу	Басейнове моделювання, аналіз впливу розораності на гідрологію	Прогноз замулення малих річок та деградації агроландшафтів

Подільська височина характеризується значними перепадами висот та інтенсивним антропогенним навантаженням. Основним завданням тут є фіксування не лише площинного, а й лінійного змиву (яругоутворення), що потребує інтеграції РЕМ-даних у ширші геоморфологічні моделі.

Для ґрунтів Поділля критично важливо досліджувати вертикальну міграцію вологи. За допомогою РЕМ-знімків ми аналізуємо не просто поверхню, а структуру вертикальних капілярів, які характерні для лесів. Мікротопографія "об'ємного" зображення дозволяє побачити, як мікротріщини в лесі стають каналами для початкової стадії ерозії. Ентропійний показник на Поділлі слугує індикатором "просідання" ґрунту. Чим вища ентропія (хаотичність) пор, тим менш стійким є ґрунт до раптових злив. Для розробки адаптивних моделей водної ерозії в умовах інтенсивного розчленування рельєфу Поділля пропонується трирівнева система фіксування змивних процесів [7].

Застосування растрової електронної мікроскопії є фундаментальним для модифікації протиерозійного проектування на Поділлі, де переважають лесові суглинки та сірі лісові ґрунти. На основі РЕМ-знімків та профілів мікрорельєфу обчислюється ентропія розподілу амплітуд. Це дозволяє математично оцінити ступінь неоднорідності поверхні зразка. Показники ентропії відображають рівень організації мікроструктури ґрунту. Для Поділля це критично, оскільки стійкість лесової основи безпосередньо залежить від конфігурації порового простору, яка визначає опір ґрунту розмиву під час злив.

Дослідження проводилися на ділянках схилів розміром 1 × 1 м. Цей рівень є ключовим для верифікації моделей змиву в умовах крутих схилів подільських товтр та

каньйонів. Використовувався метод короткобазисної фотограмметрії. Спеціальна фотоустановка фіксувала стан поверхні до та після дощу (або штучного дощування). На основі стереозображень будуються 3D-моделі (TIN або GRID) та картограми змиву в масштабі 1:50. Обчислення реальних об'ємів винесеного ґрунту дозволяє адаптувати коефіцієнти еродованості для місцевих типів ґрунтів.

Моніторинг охоплює території площею 50–500 га, що відповідає типовим агроландшафтам межиріч Дністра, Південного Бугу та їх приток. Цифрові моделі рельєфу (ЦМР) створюються шляхом оцифрування карт, використання топографічних знімачів та даних дистанційного зондування (ДЗЗ). Морфометричний аналіз ЦМР дозволяє виділити мережу орографічних ліній (вододілів і тальвегів), розрахувати крутизну, експозицію та довжину схилів – головні чинники формування стоку на Поділлі. Ерозійне районування виконується на основі опрацьованих даних класифікації територій за ступенем небезпеки. Це визначає пріоритетність подальших локальних досліджень та місця закладання нових стаціонарних полігонів [8].

Використання ЦМР у поєднанні з даними РЕМ-мікроскопії дає змогу розробляти адаптивні математичні моделі. Враховуючи специфіку Поділля (глибокі ерозійні врізи та високу розораність), класифікація чинників ерозії дозволяє вибрати оптимальну модель для кожного підregionу.

Системне поєднання мікроструктурного аналізу (РЕМ) та регіонального ГІС-моделювання забезпечує прийняття коректних управлінських рішень для запобігання деградації унікальних ґрунтових ресурсів Подільської височини.

Реалізація будь-якої моделі ерозії вимагає ґрунтової підготовки: від формування бази статистичних та картографічних даних до калібрування прецизійного обладнання. В умовах Подільської височини математичне моделювання є пріоритетним інструментом для контролю, планування та обліку ерозійно-небезпечних сільськогосподарських угідь.

З огляду на державну систему моніторингу, особливу увагу слід приділяти регіонам з найвищою інтенсивністю ерозії. Поділля, з його каньйоноподібними долинами та потужними лесовими відкладами, належить саме до таких територій. Тут необхідно розгортати універсальні зональні геостаціонари (УЗГ) – мережі пунктів багаторічних безперервних спостережень за динамікою ерозійних процесів. Впровадження моніторингу в межах Поділля передбачає виконання таких стратегічних завдань:

Визначення специфічного переліку індикаторів ерозійної деградації, характерних для сірих лісових ґрунтів та чорноземів на лесах (зокрема, глибина ерозійного врізу та швидкість росту ярів). [9]

Потребують створення базових цифрових моделей об'єктів ерозії на основі топографічних карт масштабів 1:25 000 – 1:100 000, що дозволяє охопити великі площі межиріч. Визначення природно-територіальних комплексів (наприклад, схилів Товтр або Придністров'я), які потребують поглибленого аналізу на нижчих рівнях (регіональному, локальному та детальному РЕМ-рівні).

Класифікація земель Поділля за видами деградації (пріоритетно – водна лінійна та площинна ерозія) та ступенем небезпеки, з урахуванням крутизни схилів та гідрологічної мережі формує детальну карту стану територій та встановлення стаціонарних пунктів для періодичних спостережень за змивом.

Постійне узагальнення даних зі стаціонарних полігонів для розробки проектів контурно-меліоративного землеробства та інших заходів протиерозійної організації території для Поділля є критично важливим, для того щоб математичні моделі

враховували енергію рельєфу. Велика різниця висот між вододілами та базисами ерозії (долинами річок) робить результати математичного моделювання основою для розрахунку економічних збитків від втрати гумусового шару.

Висновки. Запропонований ієрархічний підхід до дослідження ерозійних процесів дозволяє врахувати специфічну міжрегіональну динаміку природних та антропогенних чинників, що зумовлюють деградацію ґрунтів Подільської височини. Для забезпечення високої точності та практичної цінності, масштаби досліджень на регіональному рівні мають корелювати з вимогами державного земельного кадастру. Зокрема, використання індексних кадастрових карт та ортофотопланів сільськогосподарських угідь у масштабі 1:10 000 є базовим для формування об'єктивної бази даних про еродовані землі Поділля.

Специфіка застосування запропонованих рівнів моніторингу вимагає синхронної візуалізації результатів. Використано матеріали, що базуються на переході від нижчих рівнів (детального та локального) до узагальнення на регіональному та зональному рівнях (КРГ та УЗГ). Такий підхід забезпечує:

- Цілісну картину розвитку ерозійних процесів у межах водозборів.
- Варіацію мікроструктурних даних (РЕМ) через польові спостереження на стокових майданчиках.
- Ефективний вибір об'єктів для довгострокового моніторингу.

Використання сучасних геоінформаційних систем (ГІС) є критичним для повної довершеності досліджень. ГІС дозволяють не лише накопичувати емпіричні дані, а й оперативно встановлювати проміжні закономірності змиву.

Для якісного відображення ерозійно-трансформованих земель Подільської височини пропонується впровадження новаторських підходів у картографуванні: метод пластики рельєфу, який дозволяє візуалізувати потокову структуру ландшафту, що є надзвичайно важливим для Поділля з його мережею каньйонів та балок; метод анаморфованого зображення (картограми), що дає змогу наочно продемонструвати інтенсивність змиву шляхом геометричного перетворення простору відповідно до величини ерозійних втрат.

Застосування цих методів забезпечить перехід від констатації фактів змиву до створення динамічних моделей, які стають основою для прийняття управлінських рішень у сфері протирозійної організації агроландшафтів Поділля.

СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ:

1. Волощук М. Д. Ерозія ґрунтів: моніторинг, моделювання, прогнозування та заходи захисту. Івано-Франківськ: Плай, 2002. 186 с.
2. Кривов'яз Є. В., Сиротенко С.А. Використання растрової електронної мікроскопії в ґрунтознавчих дослідженнях. *Вісник аграрної науки*. 2018. № 10. С. 15–21.
3. Кирильчук А. А. Генетичні особливості та мікроморфологія сірих лісових ґрунтів Подільської височини. *Наукові записки Тернопільського національного педагогічного університету*. Серія: Географія. 2016. № 1. С. 34–41.
4. Ковальчук І. П., Сивий М.В. Геоінформаційне моделювання ерозійних процесів у басейнах рік Поділля. *Гідрологія, гідрохімія і гідроекологія*. 2010. Т. 2 (19). С. 156–164.
5. Мендель В. П. Застосування методів математичної морфології при дослідженні ерозійних процесів за матеріалами аерофотозйомки. *Геодезія, картографія і аерофотознімання*. Львів, 2017. Вип.85. С.83-92
6. Мендель В. П. Картографування сільськогосподарських земель в умовах прояву водної ерозії. *Вісник НУВГП*. 2013. №3 С. 41–42

7. Мельник Л. Л. Моделювання ерозійних процесів на основі ГІС-технологій. Київ: *Аграрна наука*. 2015. 210 с.
8. Світличний О. О., Чорний С.В. Основи ерозієзнавства. Херсон: Олді-плюс, 2007. 256 с.
9. Чорний С. В. Оцінка ерозійної небезпеки агроландшафтів. Миколаїв: МДАУ, 2005. 160 с.

Дата першого надходження статті до видання: 02.04.2026

Дата прийняття статті до друку після рецензування: 01.05.2026

Дата публікації (оприлюднення) статті: 22.05.2026
