

Процеси площинної ерозії у флювіальній геоморфосистемі Бистриці Тисменицької та перспективи геопланування території

Галина Байрак* (orcid.org/0000-0002-4802-2706),

Олена Луцишин (olena.lutsyshyn@lnu.edu.ua)

Львівський національний університет імені Івана Франка

* halyna.bayrak@lnu.edu.ua

Анотація. У статті представлено результати комплексного дослідження площинних змивів на схилах у межах гірської частини басейну р. Бистриці Тисменицької. Дослідження проведено на прикладі буроземів гірсько-лісових опідзолених, сформованих на делювії карпатського флішу. Для виявлення морфологічних особливостей рельєфу, просторової структури стоку та змін ґрунтового покриття застосовано поєднання картографічного аналізу, методів ГІС і моделювання, дистанційного зондування Землі (ДЗЗ) та польових досліджень. У середовищі QGIS здійснено накладання цифрової моделі рельєфу (30 і 90 м/пікс), космознімків Bing, Landsat та Google Earth, а також у модулі SAGA змодельовано мережу дрібноструменевих водотоків і їхню щільність.

На супутникових знімках ранньовесняного періоду виявлено чітко виражені зони площинних змивів, зокрема на середніх частинах схилів із прямим і випуклим поздовжнім профілем. Польові дослідження підтвердили закономірне зменшення вмісту гумусу (від 2,91 % у не змитих ґрунтах до 0,94–1,12 % у сильно змитих) та поступове зростання вмісту фізичної глини (<0,01 мм) униз по схилу. Ерозія найінтенсивніше розвивається у середніх частинах випуклих у поздовжньому профілі схилів та у верхніх частинах прямих схилів. Відіграє роль також поперечна кривизна схилів: у місцях, де поширені збірні мікробасейни, змив сповільнюється і відбувається незначна акумуляція; де поширені розсіюючі мікрородозбори – там змив наростає; на прямих – змив однорідний.

Важливу роль у стримуванні розвитку площинної ерозії відіграє сучасне мозаїчне землекористування: на приватних полях вирощуються різні культури, багато ділянок залишається під багаторічними травами, між полями збереглися смуги дернини, що виконують функції природних протиерозійних бар'єрів. Такі умови сприяють ретардації змивів, на відміну від періоду суцільної оранки великих полів у радянський час.

На основі результатів обґрунтовано підходи до геопланування, зорієнтовані на збереження ґрунтового покриття. Доцільним є диференційоване землекористування з урахуванням ерозійної вразливості, переважне використання схилів із високим ризиком змиву під багаторічні трави або залуження, збереження наявних лісосмуг, стежок і сіножатей як структурних елементів громадського простору. Отримані дані можуть бути використані для екосистемного планування територій у межах передгірських агроландшафтів.

Ключові слова: флювіальні геоморфосистеми; рельєф; морфодинаміка; площинна ерозія; деградація ґрунтів; QGIS; ДЗЗ; Карпатський регіон.

Sheet erosion in the Bystrytsia Tysmenytska fluvial geomorphosystem and territorial geoplanning perspectives

Galyna Bayrak* (orcid.org/0000-0002-4802-2706)

Olena Lutsyshyn (olena.lutsyshyn@lnu.edu.ua)

Ivan Franko National University of Lviv

* halyna.bayrak@lnu.edu.ua

Abstract. This paper presents the results of a comprehensive study of sheet erosion on hillslopes within the mountainous part of the Bystrytsia Tysmenytska River basin (Ukrainian Carpathians). The research was conducted using the example of podzolized mountain-forest brown soils (Cambisols) developed on colluvial deposits of the Carpathian Flysch. To identify the morphological features of the relief, spatial patterns of surface runoff, and changes in soil cover, an integrated approach was applied, combining cartographic analysis, GIS-based methods and modelling, remote sensing (RS), and field investigations. Within the QGIS environment, a combination of digital elevation models (30 m and 90 m resolution), satellite imagery from Bing, Landsat, and Google Earth was utilized. Using the SAGA module, a fine-scale stream network and its density were modelled based on automatic flow direction algorithms.

Early-spring satellite images revealed well-defined zones of sheet erosion, particularly in the middle sections of hillslopes with straight and convex longitudinal profiles. Field investigations confirmed a consistent decline in humus content (from 2.91% in uneroded soils to 0.94–1.12% in severely eroded ones), as well as a gradual increase in the proportion of fine clay particles (<0.01 mm) downslope. Erosion processes are most intense in the middle parts of convex hillslopes and the upper sections of straight slopes. Transverse slope curvature also plays an important role: in convergent microbasins, erosion is retarded and minor sediment accumulation occurs; in divergent microcatchments, runoff and erosion intensify; in linear profiles, erosion is relatively uniform.

The contemporary mosaic land use structure serves as a significant factor in retarding sheet erosion: private land plots are cultivated with a variety of crops, many fields are under perennial grasses, and turf strips between fields act as natural anti-erosion barriers. These features contrast with the extensive monocultural tillage practices of the Soviet period and promote erosion retardation.

Based on the findings, landscape-based geoplanning strategies aimed at soil conservation are proposed. These include differentiated land use based on erosion vulnerability, prioritizing perennial grasses or grass cover for high-risk slopes, and maintaining existing forest belts, pathways, and meadows as integral elements of public landscape structure. The results may inform ecosystem-based territorial planning within foothill agricultural landscapes.

Keywords: fluvial geomorphosystems; morphodynamics; relief; soil erosion; sheet erosion; soil degradation; QGIS; remote sensing; Carpathian region.

Вступ. Флювіальні геоморфосистеми у межах Карпатського регіону, зокрема басейн Бистриці Тисменицької, є динамічними елементами географічного простору, де взаємодіють природні та антропогенні чинники. Одним із процесів, що формує сучасну морфологію схилів, є площинний змив – початкова стадія ерозії, яка спричиняє втрату ґрунтового покриву, деградацію ландшафтів та зміну поверхневого стоку. Його інтенсивність визначається комбінацією

природних чинників (клімат, геологія, рельєф, ґрунти, рослинний покрив) та антропогенних впливів, серед яких провідну роль відіграє характер і ступінь землекористування. Впродовж XX століття посилене сільськогосподарське освоєння схилів у межах Карпат і Передкарпаття сприяло активізації площинного змиву та пов'язаних з ним ерозійних процесів.

Однак останні десятиліття супроводжуються помітним скороченням обсягів агровикористання, зростанням частки перелогових земель, ренатуралізацією схилів та відновленням природного рослинного покриву. Ці зміни у структурі землекористування зумовлюють ретардаційні (уповільнювальні) тенденції у площинному змиві. Стабілізація ерозійних процесів, відновлення природної рослинності та потенціал екосистемних послуг ставлять перед дослідниками завдання оцінки сучасного стану басейнових морфосистем та їхньої спроможності бути основою для сталого геопланування.

Мета роботи – виявлення геоморфологічних особливостей поширення площинних змивів на прикладі гірської частини басейну Бистриці Тисменецької у контексті сучасного геопланування сільських територій.

Площинний змив (sheet erosion, rill erosion) належить до базових форм ерозії тимчасового стоку і є початковою стадією ерозійного процесу, яка передуює формуванню вимоїн і ярів. Цей процес вважають результатом впливу крапель дощу та поверхневого стоку на оголений або недостатньо захищений ґрунт, особливо в умовах порушення рослинного покриву. Площинні змиви формуються мікроструменевою мережею тимчасових потоків, які формують схиловий стік у басейнових геоморфосистемах.

Площинну ерозію можна трактувати з двох позицій: як геоморфологічне явище та як один із проявів деградації ґрунтового покриву.

З точки зору геоморфологічного процесу вона разом із лінійною ерозією є частиною процесу тимчасового водного стоку. При цьому здійснюють оцінку морфологічних передумов розвитку процесу – довжини, форми, крутості схилів, а також загальної глибини і густоти розчленування рельєфу. Важливим у цьому аспекті є дослідження особливостей формування ерозії у контексті фізичних основ руху потоку, зривання частинок ґрунту і локалізації стоку. Доповнюється вивчення поверхневої ерозії як геоморфологічного процесу морфометричними характеристиками утворених форм – струменевими мікророзмивами на схилі.

Другий аспект площинної ерозії – це її дослідження як прояву деградації ґрунтів, що є одним із предметів аналізу ґрунтознавчої науки. При цьому вивчають властивості ґрунтів і ґрунтотворних порід, визначають ступені змитості ґрунтів, природні та антропогенні фактори у контексті їхньої ерозійної здатності. У результаті досліджень складають карти ерозійної небезпеки ґрунтів та здійснюють обґрунтування ефективних протиерозійних заходів.

З історії досліджень. Дослідження ерозії ґрунтів у світі активізувалися у 1930-х роках у зв'язку із зростанням еродованості розорюваних територій і зосереджувалися на дослідженні еродованих ділянок США, Європи, Австралії та Китаю. Період 1960–1980-х років характеризувався дослідженням головних чинників, які вплинули на розвиток ерозії та пошуком оптимальних формул, які б описали характер впливу того чи іншого чинника. Введення такого чинника як індекс ерозійності опадів (R) остаточно дало універсальне рівняння втрати ґрунту – Universal Soil Loss Equation, скорочено USLE, про що було детально

описано в публікації Harvey, Watson & Schumm, 1985. За результатами польових досліджень 1970–1990-х років було з'ясовано річні темпи ерозії у різних країнах для природних, культивованих земель й оголених ґрунтів, та уточнено ці дані для XXI ст. (Panagos et al., 2015). Сучасні дослідження XXI ст. направлені на узагальнення досвіду попередніх досліджень, комплексне висвітлення процесів ерозії ґрунтів, методів, які можна використовувати для їх контролю, а також питань, пов'язаних із розробкою та впровадженням програм збереження ґрунтів. Класична праця, яка систематизує знання про форми ерозії, їхні чинники і методи контролю, включаючи площинний змив, була публікація британського дослідника R. P. C. Morgan на основі досліджень 1980-х років (Morgan, 2005). Підходи до моделювання площинного змиву, зокрема в межах родини моделей USLE (RUSLE, MUSLE), та їхню ефективність у прогнозуванні ерозійних втрат підсумовані у публікації Kinnell, P. I. A. (2010). Систематизовані знання про типи ерозії, включаючи площинний змив, у різних регіонах Європи, з урахуванням соціально-економічних змін, представлені у колективній монографії J. Boardman & J. Poesen (Boardman et al., 2006). Ряд досліджень присвячені впливу змін землекористування на динаміку водної ерозії з можливими сценаріями її стабілізації і відновленням ґрунтів (Borrelli et al., 2017; Montgomery, 2007; Van Oost et al., 2000).

В Україні активні ґрунтові обстеження виконувалися 1957–1991 років, зокрема, протягом 1957–1961 років було проведено суцільне картографування ґрунтів нашої території (Луцишин та ін., 2016). У середині XX ст. були засновані науково-дослідні інститути та школи науковців, які всебічно досліджували види ґрунтів, їхню деградацію, властивості та чинники ґрунтоутворення в сільськогосподарських регіонах країни. Виросла плеяда науковців, які розробили методiku ґрунтознавчих досліджень, здійснювали детальні польові обстеження, провели ряд експериментів та реалізовували моделювання для з'ясування чинників ґрунтоутворення, типів і видів ґрунтів та особливостей їхньої деградації. Серед них відзначимо С. С. Соболева (1948); І. М. Гоголева (1967); Г. Швєбса (1974); М. Заславського (1983); М. Волощука (1978, 1981, 1996); О. Болуха, М. Кіта (1972–1975); С. Позняка (2003–2020); О. Світличного (2004–2022) та ін. (Байрак, 2018; Лукач, 2013).

У результаті досліджень було з'ясовано, що площа сільськогосподарських угідь, які зазнають впливу водної ерозії в Україні, становить 13,4 млн га (32 %), у тому числі 10,6 млн га орних земель. У складі еродованих налічується 4,5 млн га середньо- і сильнозмитих ґрунтів (Волошук, 2013; Лємега та ін., 2023). З продуктами ерозії виноситься до 24 млн. тон гумусу та інших поживних речовин, а урожайність сільськогосподарських культур на еродованих ґрунтах на 20-60 % нижча, ніж на нееродованих (Наукові..., 2010). Тому багато орних земель, особливо у гірських районах, які були сильно деградовані, станом на сьогодні вилучені із сільськогосподарського обробітку. У зв'язку з цим інтенсивність і площа поширення ерозійних процесів поступово зменшується.

Методи досліджень. Для виявлення особливостей площинних змивів у гірській частині басейну р. Бистриці Тисменицької були використані такі методи.

1) Картографічний. Підібрано великомасштабні топографічні карти для вивчення рельєфу та природокористування території.

2) ГІС-методи. У програмному середовищі QGIS було здійснено накладання шарів геокодованих карт, 3d-моделі рельєфу з вільнодоступного сервера Mapzen Global Terrain роздільної здатності 90 м/пікс і космозображень з ресурсу Bing для аналізу досліджуваної території.

3) Методи моделювання. За допомогою модуля Open Topography DEM Downloader було завантажено цифрову 3d-модель рельєфу роздільної здатності 30 м/пікс. У модулі SAGA/Terrain Analysis програми QGIS на її основі створили шар дрібноструменевих водотоків і моделювали їхню щільність. Моделювання базувалося на автоматичному визначенні напрямів стоку. Принцип полягає в тому, що потік від пікселя із більшим значенням висоти направляється до сусідніх пікселів із меншими показниками абсолютних висот.

4) Методи ДЗЗ. У ресурсі Google Earth аналізували супутникові дані великої роздільності здатності, які були отримані у ранні весняні періоди 2014, 2019 років. Інтенсивність проявів змивів на космозображеннях визначали за світлістю відтінків кольорів зораних полів (Байрак, 2016). Для порівняння із даними 1985 р. завантажили відповідні середньомасштабні космознімки Landsat-4-5TM з ресурсу EO Browser

5) Польові обстеження. Польові роботи проведено експедиційним методом. Досліджено сучасний прояв площинних змивів. Проби ґрунту, для подальших лабораторно-аналітичних досліджень, відібрано з верхнього генетичного горизонту згідно ДСТУ 4287:2004 Якість ґрунту. Відбирання проб.

6) Лабораторно-аналітичні дослідження. Вміст гумусу у взятих пробах визначено методом Тюріна в модифікації Нікітіна (ДСТУ 4289:2004 Якість ґрунту. Методи визначення органічної речовини). Він полягає в окисненні органічної речовини ґрунту хромовою сумішшю в сильноокислому середовищі під час нагрівання у термостаті за температури 105°C. Вміст Карбону визначають за оптичною щільністю, яку вимірюють на спектрофотометрі при довжині хвилі 590 нм і порівнюють з калібрувальним графіком.

Визначено також гранулометричний склад ґрунту з метою отримання відсотку вмісту фракції фізичної глини (ДСТУ 4730:2007 Якість ґрунту. Визначання гранулометричного складу методом піпетки в модифікації Н.А. Качинського). Метод визначення гранулометричного складу ґрунту базується на залежності (закон Стокса), що існує між швидкістю падіння частинок у стоячій воді та їхнім діаметром: швидкість осідання частинок під впливом гравітації у рідині певної щільності та в'язкості пропорційна радіусу частинок.

Район досліджень. Довжина р. Бистриці Тисменицької у межах Карпат становить 17,1 км. Гірська частина басейну належить до геоморфологічної області Скибових Карпат, району Верхньодністерських Бескидів (рис. 1). Для нього характерний низькогірний рельєф з абсолютними висотами вершин 600–1000 м та округлими обрисами хребтів. Широкі поздовжні долини простягаються вздовж напрямів хребтів і розчленовують район на окремі масиви. Поперечні долини прорізаються між хребтами і є вузькими. Долина Бистриці теж має поздовжні і поперечні ділянки із значною перевагою поздовжніх. Поперечні вузькі ділянки долини знаходяться в межах сіл Залокоть і південна околиця Підбужа–Підмонастирок. Долина тут сягає ширини 700–900 м, асиметрична: із крутими східними схилами і пологішими західними. Поздовжні ділянки

розташовані на відрізках сіл Бистриця Гірська–Смільна і Опака– частина Підбужа–Сторона. Схили тут розлогі, крутістю у придолинних частинах 7–9°, у привершинних – 15°; ширина долиної улоговини сягає 1,5 км. Придолинні схили зайняті сільськогосподарськими угіддями, а привершинні – смереково-буковими лісами. Поширені бурі гірсько-лісові ґрунти переважно щебенюваті ґрунти на елювії-делювії щільних порід (Ґрунти Львівської..., 2020). Вивчення особливостей площинних змивів, які приурочені до орних угідь на придолинних схилах, було предметом наших досліджень.

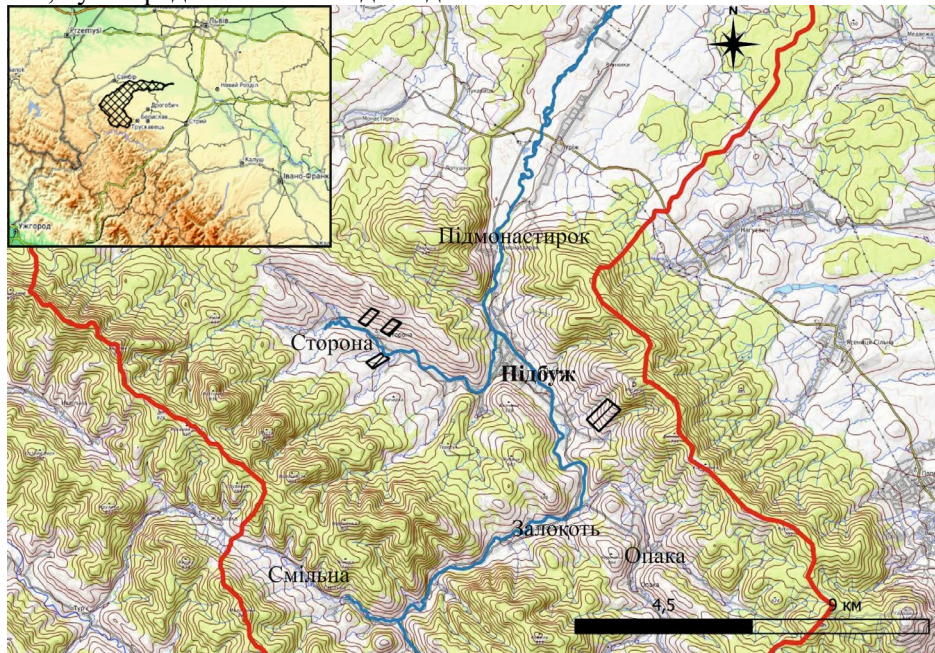


Рис. 1. Місцез положення басейнової геоморфосистеми Бистриці Тисменицької і ключових ділянок

Fig. 1. The location of the basin geomorphosystem Bystrytsya of Tysmenytska and key areas

Геоморфологічні чинники розвитку змивів. Чинниками, які викликають розвиток ерозії, є крутосхилловий рельєф, вологий клімат, пухкий геологічний субстрат та розріджена або відсутня рослинність. Визначальними геоморфологічними чинниками є морфометричні характеристики схилу: ухил, довжина, повздовжня форма, поперечна кривизна та його експозиція (Швебс, 1981; Світличний та ін., 2007; Наукові основи..., 2010).

Фактор ухилу (крутості) схилів. Інтенсивність ерозійного схилового процесу прямо пропорційна величині його ухилу. На підставі численних досліджень було встановлено, що залежність має ступеневий вигляд. Показник ступеня визначає швидкість зростання інтенсивності змиву із зростанням ухилу. Так, для пару (зябу) у середньому він становить 1,3–1,5, тобто при збільшенні ухилу удвічі інтенсивність змиву збільшується у 2,5–2,8 рази. Якщо наявні сільськогосподарські культури, то показник ступеня зменшується пропорційно їхній протиерозійній стійкості: до 1,2–0,9 для густопокривних культур і 0,8–0,7

для багаторічних трав і природних травостоїв (Швебс, 1981). Ерозійно небезпечними вважають схили крутістю від 7° (Кравчук, 2006).

Фактор довжини схилів. Інтенсивність змиву ґрунту прямо пропорційна довжині схилу: чим довший схил, тим більш інтенсивно проявляються на ньому ерозійні процеси. Проте ця залежність дійсна у випадку, коли транспортувальна здатність схилового потоку більша, ніж кількість наносів, що фактично переносяться. Зі зростанням відстані від вододілів зростає також каламутність потоку, тому на великих відстанях від вододілів надходження твердого матеріалу значно перевищує його транспортувальну здатність, тоді ерозійний розмив або припиняється або змінюється на акумуляцію. За натурними моделюваннями, зокрема Л. Ф. Литвина (1981), зона ерозії становить від 30–40 до 80 м, решта схилу є транзитно-акумулятивною зоною. За дослідженнями І. К. Срібного (1979), збільшення модуля змиву спостерігається на орних землях довжиною 50–200 м від вододілу (Світличний та ін., 2007). Швидкості стікання води у струменях на різних ділянках схилів становлять від 0,2–0,3 до 1,5–1,6 м/с.

Фактор позовжньої форми схилів. Найбільш ерозійно небезпечними є випуклі схили, найменш – увігнуті. На випуклих схилах ухили більші і відповідно зростає глибина стікання води, що забезпечує збільшення як еродуючої, так і транспортувальної здатності потоків, і як результат – наростання змиву ґрунту.

Фактор поперечної кривизни схилів. Більш ерозійно небезпечними є схили, які мають збірний мікробасейн, на відміну від прямого чи розсіюючого. На схилах, які збирають стік, унаслідок зменшення ширини схилу з віддаленням від вододілу обов'язково спостерігається збільшення глибини схилового потоку і, відповідно, збільшення його швидкості та еродуючої і транспортувальної здатності. Приблизні значення ерозійної небезпеки схилів, що збирають стік, відносно прямих – 1,2, тих, що розсіюють, – 0,8 (Наукові основи..., 2010).

Фактор експозиції схилів. Схили холодних експозицій (північної і західної) більш ерозійно небезпечні, ніж теплих (південної і східної). У весняний період на схилах холодних експозицій весняний стік більший, ніж на схилах південної і східної експозиції за рахунок більшої глибини снігу і запасу води перед сніготаненням. У випадку змиву зливовими водами, на холодних експозиціях ґрунти бувають більш вологими, ніж на теплих, тому їхня ерозійна здатність більша (Світличний та ін., 2020, с. 26).

Наші дослідження присвячені аналізу впливу цих факторів на окремо взяті ділянки у басейновій геоморфосистемі Бистриці.

Результати досліджень. Для аналізу особливостей розвитку ерозії були вибрано чотири ключові ділянки в околицях сіл Підбуж та Сторона.

За детальними космознімками Google Earth було визначено зони сильної, середньої і слабкої ерозії на полях, а також ділянки незмитих ґрунтів. Важливою діагностичною ознакою змитих ґрунтів є вміст гумусу в орному горизонті, який виявляється в інтенсивності його темного забарвлення (рис. 2). За відтінками кольору свіжозораних полів можна визначити ступінь еродованості ґрунтів. Цю особливість чітко видно на супутникових знімках, на яких за різною інтенсивністю забарвлення можна виділити ґрунти різної ступені еродованості. Найбільш еродовані – це ті, в яких колір найсвітліший, майже білий. Відповідно світлість кольору зменшується від середньо до слабозмитих ґрунтів. Незмиті

грунти мають найтемніше зображення в межах того самого поля. Під час польових досліджень були взяті проби ґрунту для підтвердження поширення ділянок різної змитості.

Порівнюючи сучасні і космознімки 1985 р. констатуємо зміну форми природокористування басейнової геоморфосистеми. Станом на 1980-і роки були поширені великоплощинні поля величиною 5–30 га (рис. 3.). Оскільки схили розчленовували глибоко врізані яри, поля займали всю поверхню мінівододілів між ярами. Вони мали прямокутну форму, видовжену вздовж схилів. Відповідно для мінімізації витрат пального орання полів виконували вздовж їхніх довгих контурів, тобто вздовж схилів, що зумовлювало розвиток поверхневої ерозії. Зараз форми нарізки угідь різко змінилися. Переважають ділянки приватних господарств площею 0,1–0,3 га. Ділянки видовжені як вниз, так і впоперек схилів.

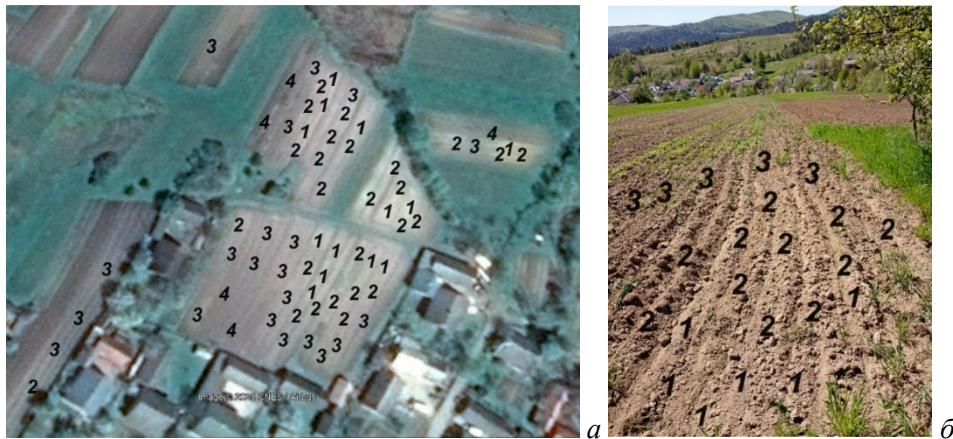


Рис. 2. Ступені змитості, які виділяються на зораних полях у басейновій геоморфосистемі Бистриці: *а* – на космознімках; *б* – на місцевості: *1* – сильна, *2* – середня, *3* – слабка. *4* – незмиті ґрунти

Fig. 2. Degrees of erosion, which are distinguished on plowed fields in the Bystrica basin geomorphosystem: *a* – on satellite images; *b* – on the ground: *1* – strong, *2* – medium, *3* – weak. *4* – uneroded soils



Рис. 3. Космознімок Landsat-4-5TM за листопад 1985 р.

(цифрами відзначено ключові ділянки)

Fig. 3. Landsat-4-5TM satellite image from November 1985 (numbers indicate key sections)

Для аналізу поперечної кривизни схилів і локалізації струменевої мережі у програмі QGIS модулі SAGA було побудовано карту мікрорусел на основі автоматизованого гідрологічного моделювання (рис. 4). Основою для карти слугувала цифрова модель рельєфу місії SRTM роздільної здатності 30 м/пікс. У модулі закладений алгоритм, за яким вода стікає від пікселя з більшим до пікселя з меншим значенням абсолютної висоти, утворюючи мережу потоків (drainage networks). У результаті моделювання відобразилися напрями стікання струменів схилового змиву, які також ідентифікують поперечну кривизну схилів.

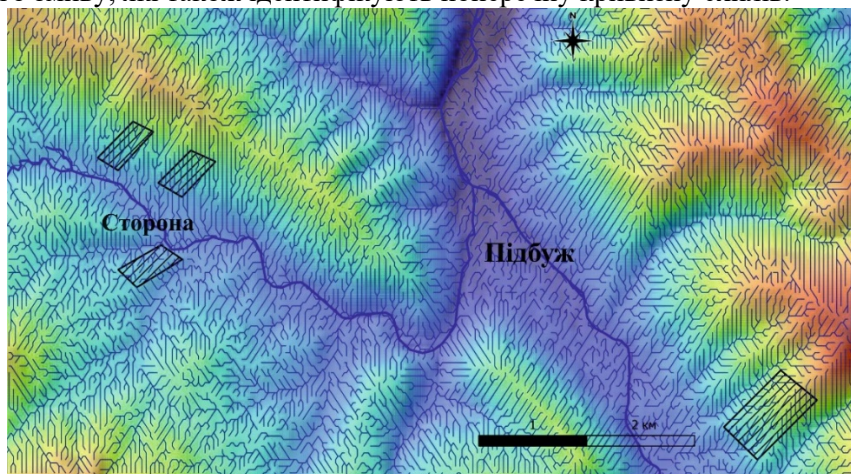


Рис. 4. Система мікрорусел, сформованих у модулі SAGA QGIS

Fig. 4. System of microchannels generated in the SAGA QGIS module

Перша ділянка розташована на схилі південно-західної експозиції (азимут 230°) поблизу с. Підбуж. Тут поширені буроземи гірсько-лісові на делювії карпатського флішу (Ґрунти Львівської..., 2020). Крутість схилу 8° , форма випукла у верхній частині, пряма у нижній (рис. 5). Довжина ділянки схилу, де знаходяться орні угіддя, становить 525 м. За картою мікрорусел з'ясовуємо кривизну ділянки і відзначаємо, що вона має тип мікродозбору, який розсіює стік. На ділянці розташовані кілька малих полів площею 0,11–0,15 га, видовжених впоперек схилу і оранка на них ведеться теж впоперек падіння схилу. У радянський період схил охоплювало три поля. Білуватими плямами виділилися змиви, які були приурочені до мінівододілів між ярами. Теперішній контур угіддя перетинає колишню ріллю впоперек. Відповідно з його верхньої, середньої і нижньої частин були взяті зразки ґрунту.

Найбільший розвиток процесів поверхневої ерозії, за даними лабораторних аналізів, приурочений до верхньої частини розорюваного угіддя. Це випуклий фрагмент схилу, на якому мікрострумені мають розсіюючий характер. У центральній частині схилу струмені направлені чітко вздовж визначального падіння схилу. У минулому тут знаходилося поле площею 6,8 га, яке мало в даному місці найбільшу змитість. Попри зменшення площі, форма схилу і успадкованість ріллі зумовлюють те, що на цій ділянці виявляється досить

суттєвий змив (табл. 1). Проте площа ділянки поверхневої ерозії утрічі менша, ніж 40 років тому, що має позитивний характер.

Отримані результати свідчать про чітку залежність вмісту гумусу від ступеня еродованості ґрунтів. У незмитому ґрунті вміст гумусу становить 1,26%, що є найбільшим показником серед досліджених зразків. Із посиленням ерозійних процесів гумусовий горизонт поступово зменшується, що проявляється у зниженні вмісту гумусу: до 1,18% у слабо змитому, 0,88% у середньо змитому і лише 0,41% у сильно змитому ґрунті. Це свідчить про втрату родючості ґрунту внаслідок ерозії.

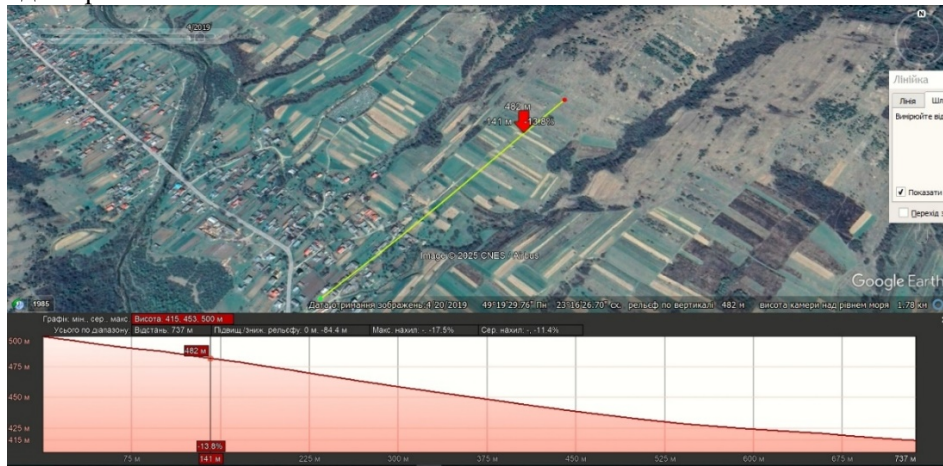


Рис. 5. Поздовжній інтерактивний профіль схилу біля с. Підбуж, побудований з використанням ресурсу Google Earth (стрілка вказує на місцевість, де були відібрані проби ґрунту першої ключової ділянки)

Fig. 5. Longitudinal interactive profile of the slope near the Pidbuzh village, which was built using the Google Earth resource (the arrow points to the area where soil samples from the first key plot were taken)

Таблиця 1. Результати аналізу ґрунту на 1-й ділянці біля с. Підбуж
Table 1. Results of soil analysis at the 1st site near the Pidbuzh village

Частина схилу у поздовжньому профілі	Ступінь змитості	Вміст гумусу, %	Вміст фракції фізичної глини (<0,01 мм), %	Назва ґрунту за гранулометричним складом
Верхня	Сильно змитий	0,41	27,4	легкосуглинковий
Середня	Середньо змитий	0,88	24,7	легкосуглинковий
Нижче середньої	Слабо змитий	1,18	22,6	легкосуглинковий
Нижня	Не змитий	1,26	20,8	легкосуглинковий

Збільшення вмісту фракції фізичної глини зі зростанням ступеня еродованості свідчить про диференціацію гранулометричного складу ґрунтів під впливом ерозії. У незмитому ґрунті вміст фізичної глини становить 20,8%, тоді як у сильно змитому – вже 27,4%. Це пояснюється тим, що ерозійні процеси

насамперед змивають легші, грубодисперсні частки (пісок, пил), залишаючи більш важкі глинисті фракції. У результаті в глибших горизонтах, які виходять на поверхню після змиву верхнього шару, зростає концентрація фізичної глини. Така зміна структури ґрунту може негативно впливати на водно-повітряний режим і загальні агрономічні властивості ґрунтів. Підвищення частки глинистих фракцій у змитих горизонтах призводить до ущільнення ґрунту, зниження його водопроникності та аерації, що є несприятливим для розвитку кореневих систем рослинності.

Отож, у даному типі ґрунтів (буроземи гірські) ерозія не лише зменшує вміст гумусу, а й змінює гранулометричний склад у бік глинистості, що в цілому знижує родючість.

Друга ключова ділянка розташована на схилі північної експозиції біля с. Сторона (рис. 6). Для неї характерні ґрунти буроземи гірсько-лісові опідзолені на делювії карпатського флішу. Поздовжній профіль схилу випуклий. Крутість від 4° у нижній частині схилу, 10° у середній, і 2° у верхній частині, де схил поступово переходить до проміжної вершинної поверхні. Довжина схилу 400 м. У поперечному плані для верхньої частини характерний прямий, а для нижньої – розсіюючий тип мікродозбору. У радянський період, як показано на космознімках 1985 р., цей схил охоплювало одне велике поле площею 32,6 га. Поверхнева ерозія була розвинена на найбільш випуклій ділянці схилу. Зараз поля мають площі 0,2–0,4 га. На найбільш випуклій середній і верхній ділянці схилу вони йдуть уперек, а на нижній – вздовж його падіння. Відповідно у цих різних частинах схилу були взяті проби ґрунту. Результати лабораторних досліджень наведені у табл. 2.



Рис. 6. Поздовжній інтерактивний профіль схилу біля с. Сторона, побудований з використанням ресурсу Google Earth (стрілка вказує на місцевість, де були відібрані проби ґрунту другої ключової ділянки)

Fig. 6. Longitudinal interactive profile of the slope near the Storona village, constructed using Google Earth (the arrow points to the area where soil samples from the second key site were taken)

У верхній частині схилу, яка характеризується незмитим ґрунтом, вміст гумусу становить 2,91%, а фізичної глини – 34,9%. Це вказує на відносно збережену структуру ґрунту, оскільки ерозія тут ще не інтенсивна через незначне водозбірне навантаження. У середній випуклій частині, де спостерігається

найбільше зниження гумусу (до 1,75%), а вміст глини трохи зростає (35,7%), відбувається найбільш активний змив. Випукла форма сприяє концентрації стоку, який ефективно змиває гумусовий горизонт, оголюючи важчі, менш родючі шари. Нижче, в середній прямій частині, ґрунт слабо змитий – гумусу більше (2,14%), а фізичної глини трохи менше (33,4%), що може свідчити про зниження швидкості змиву, а також про часткове осідання перенесених часток з вищележачих ділянок. У нижній акумулятивній частині спостерігається максимальний вміст гумусу (3,08%) і фізичної глини (37,2%). Це підтверджує факт акумуляції знесеного матеріалу – сюди переміщуються як органічні речовини, так і дрібнодисперсні глинисті частки з вищих частин схилу.

Таблиця 2. Результати аналізу ґрунту на 2-й ділянці біля с. Сторона (схил північної експозиції)

Table 2. Results of soil analysis at the 2nd site near the Storona village (northern slope)

Частина схилу у поздовжньому профілі	Ступінь змитості	Вміст гумусу, %	Вміст фракції фізичної глини (<0,01 мм), %	Назва ґрунту за гранулометричним складом
Верхня	Не змитий	2,91	34,9	середньосуглинковий
Середня	Середньо змитий	1,75	35,7	середньосуглинковий
Нижче середньої	Слабо змитий	2,14	33,4	середньосуглинковий
Нижня	Акумуляція	3,08	37,2	середньосуглинковий

Отож, простежується типовий розвиток площинної ерозії: змив гумусу і легших фракцій у середній частині схилу та їх акумуляція в нижній. Хоч поля знаходяться поперек до схилу і між ними є ряди багаторічних трав вздовж стежок, проте попереднє сільськогосподарське використання цього схилу наклало відбиток на сучасний стан ерозійних процесів.

Третя і четверта ключові ділянки. Розташовані на схилі південної експозиції західніше і східніше від середини схилу. Ґрунти буроземно-підзолисті оглеєні на делювіальних відкладах. Довжина відрізка схилу 400 м. Для нього характерний прямий поздовжній і прямий поперечний профіль. Мікрорусла напрямлені здебільшого паралельно один до одного, лише на західній ділянці частина їх збірного типу. Крутість схилу більша, ніж на перших двох ділянках і становить 13–16° у середній частині, у нижній – зменшується до 5° (рис. 7). Станом на 1985 р. на третій ділянці знаходилося колгоспне поле площею 12 га, а на четвертій – 27 га. Вони були видовжені вздовж падіння схилу і охоплювали його частину між двома сусідніми ярами. Зараз приватні поля теж видовжені в напрямі падіння схилу, площі в середньому становлять 0,1 га. Результати аналізів проб ґрунту, які було нами взято з різних частин схилу, наведені в табл. 3.

На верхніх частинах розорюваного схилу на обох ділянках поширений сильно змитий ґрунт з низьким вмістом гумусу і зниженим вмістом фізичної глини, легкосуглинковий. Це типовий наслідок багаторічного змиву гумусового

горизонту в умовах активного поверхневого стоку, який посилювався на відкритих полях радянського періоду. На 4й ділянці втрата гумусового горизонту досить значна, оголено більш щільні горизонти, які важко відновити природним шляхом.

Середня та нижче середньої частини схилу на 3-й ділянці – обидві акумулятивні, з підвищеним (хоч і невисоким в абсолютних значеннях) вмістом гумусу (1,93%) і фізичної глини (29,2–29,8%). Завдяки формуванню збірного типу мікробасейну в поперечному профілі тут накопичуються як органічні, так і мінеральні компоненти, що свідчить про локальне сповільнення стоку та незначну акумуляцію у цій частині. У даному випадку морфологія схилу відчутно вплинула на перерозподіл матеріалу.

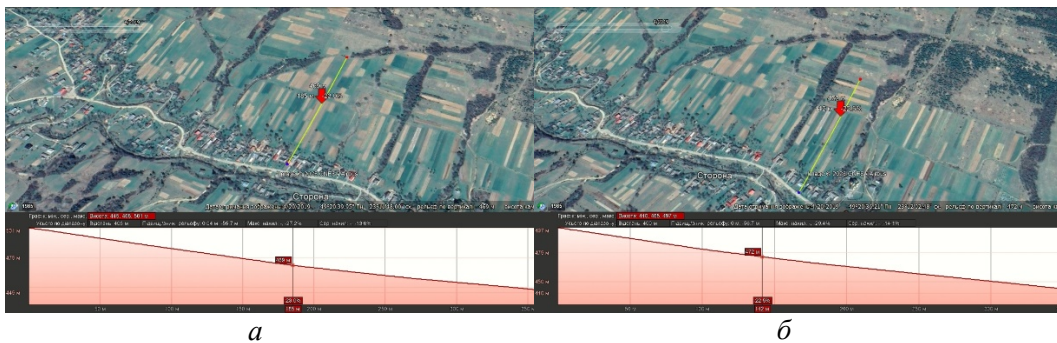


Рис. 7. Поздовжні профілі схилів південної експозиції біля с. Сторона, на яких розташовані ключові ділянки: *a* – третя, *б* – четверта

Fig. 7. Longitudinal profiles of the slopes of the southern exposure near the Storona village, on which the key areas are located: *a* – third, *b* – fourth

Таблиця 3. Результати аналізу ґрунту на 3–4-й ділянках біля с. Сторона (схил південної експозиції)

Table 3. Results of soil analysis in the 3rd–4th plots near the Storona village (south-facing slope)

	Частина схилу у поздовжньо-му профілі	Ступінь змитості	Вміст гумусу, %	Вміст фракції фізичної глини (<0,01 мм), %	Назва ґрунту за гранулометричним складом
Третя ділянка	Верхня	Сильно змитий	1,12	25,4	Легкосуглинковий
	Середня	Акумуляція	1,93	29,2	Легкосуглинковий
	Нижче середньої	Акумуляція	1,93	29,8	Легкосуглинковий
	Нижня	Слабо змитий	1,23	31,0	Середньосуглинковий
Четверта ділянка	Верхня	Сильно змитий	0,94	31,7	Середньосуглинковий
	Середня	Середньо змитий	1,10	30,1	Середньосуглинковий
	Нижче середньої	Слабо змитий	1,25	29,5	Легкосуглинковий
	Нижня	Не змитий	3,02	27,0	Легкосуглинковий

Нижня частина схилу 3-ї ділянки має слабо змитий ґрунт, вміст гумусу дещо нижчий (1,23%), але фізичної глини більше (31,0%), і гранулометричний склад – середньосуглинковий. Це вказує на локальне ущільнення, що гальмує вертикальну фільтрацію та може призводити до оглеєння в умовах надмірного зволоження.

Середня частина 4-ї ділянки є середньо змитою, гумусу лише 1,10%, фізичної глини – 30,1%. Спостерігаємо незначне покращення стану ґрунту, проте також прояв поверхневого змиву. Через відсутність мікробасейну (поперечна форма пряма) акумуляція тут мінімальна, і органічна речовина не затримується. Нижче цієї частини схилу починається поступове зменшення інтенсивності ерозійного процесу, проте відновлення все ще неповне.

Нижня частина схилу 4-ї ділянки має не змитий ґрунт, вміст гумусу високий (3,02%) і найменше фізичної глини (27,0%). Це свідчить про накопичення не тільки дрібнодисперсної, а й органічної фракції, що компенсує втрати у верхніх частинах. Природні властивості буроземів відновлюються.

Загалом верхня частина схилу демонструє типові ознаки площинної ерозії: деградацію гумусового горизонту, зростання глинистості, зміщення гранулометричного складу. Ерозійні процеси призводять до змиву гумусового горизонту, з якого виносяться як органічна речовина, так і легші фракції. Внаслідок цього зменшується вміст гумусу, а гранулометричний склад ґрунту змінюється – зростає частка фізичної глини. Це вказує на деградацію верхнього шару й оголення нижчих, більш важких за гранулометричним складом горизонтів, бідних на органіку. Для буроземів це особливо критично, оскільки їхня родючість і здатність підтримувати будь-яку рослинність значною мірою залежить від вмісту гумусу, гранулометричного складу ґрунту та рівня зволоження. Бачимо, що у змитих ґрунтах погіршується водопроникність, знижується біологічна активність і порушується живлення рослин, що загалом знижує стійкість екосистем і прискорює деградаційні процеси в умовах Карпатських схилів. У нижніх частинах відбувається надмірне накопичення органіки та фізичної глини, що формує переущільнені, надмірно вологі ґрунти, не характерні для природного стану буроземів.

Обговорення. Площинна (поверхнева) ерозія у великій мірі залежить від морфології і крутості схилів. Рельєф є тим чинником, який керує просторовою диференціацією площинної ерозії. Вона найінтенсивніше розвивається у середніх частинах випуклих у поздовжньому профілі схилів та у верхніх частинах прямих схилів. Вони є власне і найбільше крутими. Випукла і пряма форма поздовжнього профілю схилів при значному їхньому ухилі на всіх ділянках створює умови для безперешкодного поверхневого стоку, який змиває гумусовий горизонт.

Відіграє роль також поперечна кривизна схилів: у місцях, де поширені збірні мікробасейни, змив сповільнюється і відбувається незначна акумуляція; де поширені розсіюючі мікродозбори – там змив наростає; на прямих – змив однорідний. Відсутність мікрорельєфу, що перериває стік, не дозволяє накопичуватись воді, а отже – й ерозійному матеріалу.

Політика укрупнення полів у радянський період (суцільна оранка без урахування рельєфу, ліквідація меж і полезахисних смуг) стала пусковим

механізмом розвитку площинної ерозії на буроземах гірського регіону. В радянський період були усунуті природні буфери (ліси, чагарники, дернини), що сприяло безперешкодному стіканню атмосферних опадів з поверхні спадистих і злегка крутих схилів. Це наклало відбиток на сучасний стан площинних змивів на малих приватних полях.

Проте, крім розвитку, спостерігаємо *сповільнення (ретардацію)* площинних змивів. Ретардація ерозії значною мірою пов'язана зі змінами у землекористуванні після розпаювання полів. На відміну від періоду суцільної оранки, тепер поля мають малі розміри, і між ними збереглися смуги дернини, які виконують функцію природних бар'єрів для поверхневого стоку та зменшують ерозійну енергію води. Багато ділянок не розорюються зовсім – там переважають багаторічні трави, які стабілізують ґрунт і сприяють його структурному відновленню. Крім того, висока строкатість у культурному використанні (різні культури в кожного власника поля) створює мозаїчність, що також порушує рівномірність ерозійного змиву. Ці чинники разом сприяють природній ретардації ерозійних процесів та частковому відновленню функціонування гірсько-лісових буроземів.

Затухання ерозійного процесу спостерігається переважно у нижніх частинах схилів, де формується акумулятивна зона: тут відбувається накопичення гумусу, зростає вміст фізичної глини, структура ґрунту частково відновлюється. Поперечна кривизна схилів у формі збірних мікробасейнів теж зумовлює затримку стоку, осідання твердого матеріалу та зниження швидкості ерозійних процесів.

Хоча багато ділянок схилів демонструють локальну ретардацію ерозії, проте її повне припинення не спостерігаємо, оскільки гумусний горизонт залишається тонким, а структура буроземів частково порушеною.

Висновки. Перспективи геопланування досліджуваної території повинні базуватись на поєднанні природоохоронного підходу з реальним характером землекористування. Найбільш ерозійно вразливими залишаються привершинні та середні частини схилів із випуклим поздовжнім профілем, де доцільно запроваджувати залуження, висівання багаторічних трав або ґрунтозахисних культур, які мають добре розвинену кореневу систему (наприклад, еспарцет, люцерна, костриця червона, суданська трава). Саме ці культури можуть суттєво зменшити змив на спадистих ділянках.

Геопланування має зосереджуватись не стільки на перебудові земель, скільки на оптимізації наявного приватного землекористування – шляхом порад, стимулів або локальних ініціатив. Варто підтримувати практику дрібноконтурного землеробства, яка сприяє уповільненню ерозії завдяки мозаїці культур і наявності нерозораних смуг.

Особливу роль у плануванні слід надати громадському простору – наявним дорогам, стежкам, лісосмугам, сіножатям та пасовищам, які часто виконують бар'єрну та акумулятивну функції. Важливо забезпечити збереження і насадження польових лісосмуг. На досліджуваній території вони часто розвиваються вздовж ярів, стежок, польових доріг. Доцільним є також збереження і розширення вже існуючих смуг дернини, які ефективно переривають поверхневий стік. Саме ці зони можуть бути використані як

природні ландшафтні елементи стабільності, що переймають потоки поверхневого стоку.

У подальшому доцільно здійснити локальне картування ступенів еродованості, щоб власники ділянок могли адаптувати свою агротехніку до реальних умов. Наприклад, вони можуть уникати глибокої оранки на сильно змитих ділянках. На схилах з мікробасейновою структурою рекомендовано залишати ці ділянки під сінокоси або багаторічні трави.

Важливо також залучити місцеве населення до екосистемного підходу в агровикористанні, через програми підтримки ґрунтозахисного господарювання.

Таким чином, реалістичне геопланування має спиратися на наявні природні бар'єри, повагу до приватного землеволодіння та поступове впровадження м'яких ґрунтозахисних практик, з урахуванням як екологічних, так і соціально-господарських умов регіону.

Подяка. Дослідження виконано в рамках теми П2-БФ "Географічні основи збалансованого використання басейнових систем в умовах зміни клімату".

БІБЛІОГРАФІЧНІ ПОСИЛАННЯ

- Байрак Г. З історії досліджень ерозійних процесів // *Методи геоморфологічних досліджень: навч. посібник*. Львів: ЛНУ імені Івана Франка, 2018. С. 143–146.
- Байрак Г. Р. Космічна інформація як засіб дослідження площевої ерозії на орних землях Волино-Подільської височини // *Аерокосмічні спостереження в інтересах сталого розвитку та безпеки: Матеріали доповідей*. Київ, 2016. ISBN 978-966-02-8019-9 (електронне видання). С.17–20.
- Ґрунти Львівської області : колективна монографія / за ред. С. П. Позняка. Львів : ЛНУ імені Івана Франка, 2020. 424 с.
- Волощук М. Деградаційні процеси та їхній вплив на екологічний стан земельних ресурсів України. *Вісник Львівського університету. Серія географічна*. 2013. Вип. 44. С. 63–69.
- Кравчук Я. Геоморфологічне картографування: навч. посібн. Львів ВЦ ЛНУ імені І. Франка, 2006. 176 с.
- Лемега Н., Гаськевич В. Процеси деградації у ґрунтах Львівської області : монографія. Львів : ЛНУ ім. Івана Франка, 2023. 480 с.
- Лукач О. Історичні аспекти вивчення ерозії ґрунтів у Західному регіоні України. *Вісник Львівського університету. Серія географічна*. 2013. Випуск 44. С. 178–185.
- Луцишин О., Гаськевич В. Ґрунти Надсянської рівнини : монографія. Львів: Видавн. центр ЛНУ імені Івана Франка, 2016. 368 с. Серія "Ґрунти України". <https://geography.lnu.edu.ua/wp-content/uploads/2020/09/GRUNTY-NADSYANS-KOYI-RIVNYNY-Has-kevych.pdf>
- Наукові та прикладні основи захисту ґрунтів від ерозії в Україні / [С. А. Балюк, Д. О. Тимченко, М. Н. Гічка та ін.] ; за ред. С. А. Балюка та Л. Л. Тovaжнянського. Харків, 2010. 460 с.
- Світличний О. О., Чорний С. Г. Основи ерозієзнавства: Підручник. Суми: ВТД "Університетська книга", 2007. С. 6–105.
- Світличний О. О., П'яtkова А. В. Прикладне ерозієзнавство: навч. посіб. Одеса: Одес. нац. ун-т ім. І. І. Мечникова, 2020. 136 с.
- Швебс Г. І. Теоретичні основи ерозієзнавства. Київ; Одеса: Вища школа, 1981. 223 с.
- Boardman, J., Poesen, J. (2006). Soil erosion in Europe. Wiley. <https://doi.org/10.1002/0470859202>
- Borrelli, P., Robinson, D. A., Fleischer, L. R., et al. (2017). An assessment of the global impact of 21st century land use change on soil erosion. *Nature Communications*, 8(1), 2013. <https://doi.org/10.1038/s41467-017-02142-7>

- Kinnell, P. I. A. (2010). Event soil loss, runoff and the Universal Soil Loss Equation family of models: A review. *Journal of Hydrology*, 385(1–4), 384–397. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2010.01.024>
- Montgomery, D. R. (2007). Soil erosion and agricultural sustainability. *PNAS*, 104(33), 13268–13272. <https://doi.org/10.1073/pnas.0611508104>

REFERENCES

- Bayrak G. Z istorii doslidzhen eroziinykh protsesiv. *Metody heomorfolohichnykh doslidzhen: navch. posibnyk*. Lviv: LNU imeni Ivana Franka, 2018. S. 143–146. (In Ukrainian).
- Bayrak G. R. Kosmichna informatsiia yak zasib doslidzhennia ploschchovoi erozii na ornykh zemliakh Volyno-Podilskoi vysochyny. *Aerokosmichni sposterezhenia v interesakh staloho rozvytku ta bezpeky: Materialy dopovidei*. Kyiv, 2016. ISBN 978-966-02-8019-9 (elektronne vydannia). S.17–20. (In Ukrainian).
- Grundy Lvivskoi oblasti : kolektyvna monohrafiia / za red. S. P. Pozniaka. Lviv : LNU imeni Ivana Franka, 2020. 424 s. (In Ukrainian).
- Voloshchuk M. Dehradatsiini protsesy ta yikhnyi vplyv na ekolohichni stan zemelnykh resursiv Ukrainy. *Visnyk Lvivskoho universytetu. Seriiia heohrafichna*. 2013. Vyp. 44. S. 63–69. (In Ukrainian).
- Kravchuk Ya. Heomorfolohichne kartohrafuvannia: navch.posibn. Lviv VTs LNU im. I.Franka, 2006. 176 s. (In Ukrainian).
- Lemeha N., Haskevych V. Protsey dehradatsii u gruntakh Lvivskoi oblasti : monohrafiia. Lviv : LNU im. Ivana Franka, 2023. 480 s. (In Ukrainian).
- Lukach O. Istorychni aspekty vyvchennia erozii gruntiv u Zakhidnomu rehioni Ukrainy. *Visnyk Lvivskoho universytetu. Seriiia heohrafichna*. 2013. Vypusk 44. S. 178–185. (In Ukrainian).
- Lutsyshyn O., Haskevych V. Grunty Nadsianskoi rivnyny : monohrafiia. Lviv: Vydavn. tsentr LNU imeni Ivana Franka, 2016. 368 s. Seriiia "Grunty Ukrainy". <https://geography.lnu.edu.ua/wp-content/uploads/2020/09/GRUNTY-NADSYANS-KOYI-RIVNYNY-Has-kevych.pdf>
- Naukovi ta prykladni osnovy zakhystu gruntiv vid erozii v Ukraini / [S. A. Baliuk, D. O. Tymchenko, M. N. Hichka ta in.] ; za red. S. A. Baliuka ta L. L. Tovazhnianskoho. Kharkiv, 2010. 460 s. (In Ukrainian).
- Svitlychnyi O. O., Chornyi S. H. Osnovy eroziieznastva: Pidruchnyk. Sumy: VTD "Universytetska knyha", 2007. S. 6–105. (In Ukrainian).
- Svitlychnyi O.O., Piatkova A. V. Prykladne eroziieznastvo: navch. posib. Odesa: Odes. nats. un-t im. I. I. Mechnykova, 2020. 136 s. (In Ukrainian).
- Shvebs H. I. Teoretychni osnovy eroziieznastva. Kyiv; Odesa: Vyshcha shkola, 1981. 223 s.
- Boardman, J., Poesen, J. (2006). Soil erosion in Europe. Wiley. <https://doi.org/10.1002/0470859202>
- Borrelli, P., Robinson, D. A., Fleischer, L. R., et al. (2017). An assessment of the global impact of 21st century land use change on soil erosion. *Nature Communications*, 8(1), 2013. <https://doi.org/10.1038/s41467-017-02142-7>
- Kinnell, P. I. A. (2010). Event soil loss, runoff and the Universal Soil Loss Equation family of models: A review. *Journal of Hydrology*, 385(1–4), 384–397. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2010.01.024>
- Montgomery, D. R. (2007). Soil erosion and agricultural sustainability. *PNAS*, 104(33), 13268–13272. <https://doi.org/10.1073/pnas.0611508104>
- Morgan, R.P.C. Soil Erosion and Conservation, 3rd edition. Blackwell Publishing, Oxford, 2005. <https://doi.org/10.1111/j.1365-2389.2005.0756f.x>
- Panagos, P., Borrelli, P., Poesen, J., et al. (2015). The new assessment of soil loss by water erosion in Europe. *Environmental Science & Policy*, 54, 438–447. <https://doi.org/10.1016/j.envsci.2015.08.012>
- Van Oost, K., Govers, G., Desmet, P. J. J. (2000). Evaluating the effects of changes in landscape structure on soil erosion by water. *Landscape Ecology*, 15, 577–589. <https://doi.org/10.1023/A:1008198215674>