УДК 631.459:528.8:574.4(477.85) *https://doi.org/10.31861/biosystems2026.02.270*

ЕКОЛОГО-БІОЛОГІЧНА ОЦІНКА ДЕГРАДАЦІЇ ҐРУНТОВИХ ЕКОСИСТЕМ ТА ЕРОЗІЙНИХ РИЗИКІВ ХОТИНСЬКОЇ ВИСОЧИНИ ЗА СПЕКТРАЛЬНИМИ ДАНИМИ SENTINEL-2

Т. В. БУДЖАК, І.І. КАЗІМІР

Чернівецький національний університет імені Юрія Федьковича,
вул. Коцюбинського, 2, м. Чернівці, Україна, 58012
budzhak.taras@chnu.edu.ua, i.kazimir@chnu.edu.ua

Ґрунтовий покрив функціонує як базовий компонент наземних екосистем, проте інтенсивне сільськогосподарське освоєння у поєднанні зі складними геоморфологічними умовами спричиняє його стрімку деградацію. Проаналізовано сучасний стан, рівень деградації та ерозійну схильність ґрунтів Хотинської височини (Чернівецька область), застосувавши методи дистанційного зондування Землі. Хотинська височина вирізняється глибоким ерозійним розчленуванням, стрімкими схилами та наявністю лесовидних відкладів, які формують надзвичайно високий природний потенціал до розвитку водної ерозії. Дослідження спирається на порівняння мультиспектральних супутникових знімків Sentinel-2 L2A за березень 2020 року та березень 2026 року для виявлення просторово-часових змін у рослинному покриві та ступені оголеності поверхні. Розраховано нормалізований вегетаційний індекс (NDVI), нормалізований індекс вологості (NDMI), індекс оголеного ґрунту (BSI) та проаналізувано спеціалізовані композитні зображення, які індикативно відображають стан відкритого ґрунту в період весняного сніготанення та ранньовесняних опадів, коли ерозійна небезпека сягає абсолютного максимуму. Результати демонструють суттєву трансформацію агроландшафтів: супутникові дані 2026 року фіксують високу фрагментацію та збереження критично оголених ґрунтів на крутосхилах порівняно з 2020 роком. Хоча загальний показник NDVI на орних землях у 2026 році зріс через аномально ранній старт вегетації, ділянки, що залишилися під відкритим ґрунтом на схилах, є індикаторами підвищеної ерозійної небезпеки та ймовірного руйнування ґрунтової структури. Отримані дані підтверджують, що сучасна система землекористування на тлі глобальних кліматичних змін мультиплікує площинний змив та втрату гумусу, інтенсивність якої на еродованих ділянках регіону досягає 1,8 т/га на рік. Зникнення захисного біологічного екрана призводить до сегрегації ґрунтових часток, руйнування агрономічно цінних агрегатів та втрати органічної речовини. У статті доведено нагальну потребу у впровадженні ґрунтозахисних і ресурсоощадних технологій обробітку, контурно-меліоративного землеробства та суцільного залуження крутосхилів. Запропонований підхід використання інтегрованих геоінформаційних моделей для безперервного моніторингу ерозійних процесів дозволить оптимізувати просторове управління земельними ресурсами Прут-Дністровського межиріччя. Результати дослідження створюють фундаментальне наукове підґрунтя для розробки дієвих регіональних стратегій збереження біорізноманіття та відновлення родючості деградованих ландшафтів.

Ключові слова: водна ерозія, деградація ґрунтів, супутникові індекси, NDVI, агроценози, біологічний екран, мікробна біомаса, дистанційне зондування, Sentinel-2, Хотинська височина, Прут-Дністровське межиріччя

Вступ. Збереження цілісності та функціональної здатності ґрунтового покриву виступає першочерговою умовою забезпечення продовольчої безпеки та екологічної стабільності агросфери (Vakhnyak, Khomovyi at al., 2025). Інтенсивна антропогенна експлуатація земельних ресурсів, порушення науково обґрунтованих сівозмін, застосування важкої ґрунтообробної техніки та глобальні кліматичні трансформації провокують масштабні процеси деградації ґрунтів. Деградація ґрунту проявляється як системне погіршення його фізичних, фізико-хімічних та біологічних характеристик внаслідок комплексної дії природних та антропогенних процесів (Волощук, 2017). Серед усіх відомих форм деградації водна ерозія залишається найнебезпечнішим та найдинамічнішим фактором руйнування педосфери. Цей процес фізично видаляє верхній, найродючіший горизонт землі разом із накопиченими поживними речовинами, гумусом та мікробіотою, що згубно впливає на загальну продуктивність сільськогосподарських угідь.

Чернівецька область, а зокрема територія Прут-Дністровського межиріччя, демонструє надзвичайно високі показники еродованості через специфічне поєднання складного рельєфу, літологічної будови та надмірного агрогенного навантаження. Хвилястий рельєф зумовлює високу вразливість місцевих ґрунтів до дії поверхневого стоку, тому основний акцент у сучасному землеробстві цього регіону дослідники

роблять саме на захисті ґрунтів від ерозії та деградації (Балюк, Товажнянський, 2010).

Традиційні польові методи оцінки деградації земель, хоча і забезпечують високу точність точкових вимірювань, потребують значних часових та фінансових ресурсів і не дозволяють оперативно охопити великі площі. Сучасні геоінформаційні системи (ГІС) та технології дистанційного зондування Землі (ДЗЗ) відкривають принципово нові перспективи для безперервного просторового моніторингу ерозійних процесів. Праці українських вчених доводять високу ефективність застосування мультиспектральних супутникових знімків для предикативного картографування ґрунтів, розв'язання проблем із точністю ґрунтових карт, ідентифікації точок забруднення та оцінки вмісту органічного вуглецю (Achasov, Achasova at al., 2025). Дослідники успішно розробляють моделі просторової оцінки ерозійної небезпеки, інтегруючи мультиспектральні супутникові знімки та спеціалізовані індекси, зокрема NDVI (Normalized Difference Vegetation Index) та BSI (Bare Soil Index), для виявлення осередків антропогенної ерозії (Trofymenko, Myslyva at al., 2023). Відкритий ґрунт без біологічного захисту, який ідентифікується за допомогою оптичних та радарних сенсорів, виступає головним індикатором ризику деградації.

Незважаючи на наявність ґрунтовних праць із загального ґрунтознавства Буковини та застосування геоінформаційних технологій, динаміка ерозійної схильності Хотинської височини в умовах останніх кліматичних аномалій вимагає детальнішого просторово-часового аналізу. Відсутність сталого снігового покриву, температурні коливання, весняні заморозки та водний дефіцит радикально змінюють умови вегетації та фізичний стан поверхні (Шевченко, Пронь та ін., 2024). *Мета дослідження* полягає у проведенні порівняльного аналізу рівня деградації та ерозійної небезпеки ґрунтового покриву Хотинської височини за період з 2020 по 2026 рік із використанням мультиспектральних супутникових даних Sentinel-2. *Для її досягнення поставлено такі завдання:* візуалізувати просторовий розподіл відкритих схилових ґрунтів у критичний ранньовесняний період, оцінити динаміку вегетаційного покриву як індикатора стійкості ландшафтів до водної ерозії та визначити структурні зміни агроценозів, що впливають на втрату родючості.

Матеріали та методи. Хотинська височина, яка становить центральний геоморфологічний елемент Прут-Дністровського межиріччя, - це хвилясте горбисте пасмо, розташоване на південь від Подільської височини, повністю в межах Чернівецької області. Територія дослідження у вказаних межах та її просторове розташування на карті адміністративно-територіального устрою України зображені на картосхемі (рис. 1).

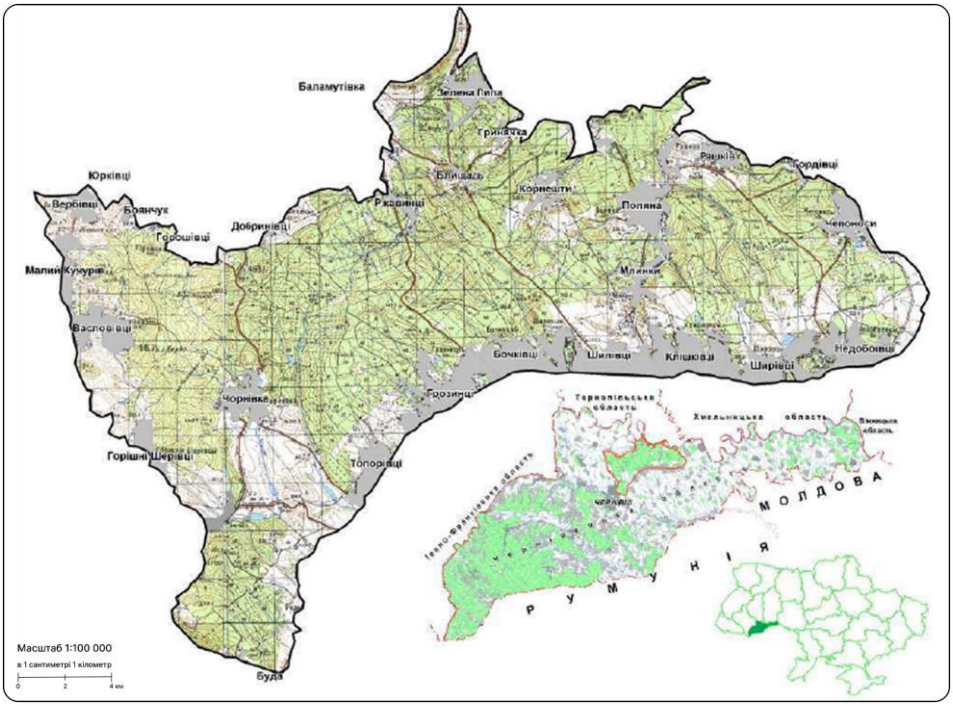


Рис. 1. Картосхема Хотинської височини та її розташування на карті адміністративно-територіального устрою України

Fig. 1. Schematic map of the Khotyn Upland and its location on the administrative-territorial map of Ukraine

Геоструктурно височина приурочена до Волино-Подільської плити Східноєвропейської платформи. Пересічні абсолютні висоти території становлять 350-400 м, а найвищою точкою виступає гора Берда (516 м над рівнем моря), яка є структурно-денудаційним останцем, вкритим природним буковим лісом (Коржик, Чорней та ін., 2012).

Географічні та літологічні особливості височини роблять її класичним природним полігоном для вивчення процесів площинного змиву, лінійної ерозії, суфозії та зсувоутворення. Загалом площа еродованих ґрунтів у регіоні стрімко зростає: статистика фіксує збільшення з 92,3 тис. га у 1959 році до понад 250 тис. га в останні десятиліття. Фундамент осадового чохла височини з поверхні перекритий пухкими четвертинними відкладами — переважно лесами та лесовидними суглинками. Їхня висока пористість та слабка водотривкість агрегатів формують літологічну передумову для легкого розмивання (Костюк, Рідуш, 2023). Рельєф вирізняється глибоким ерозійним розчленуванням, густою мережею долин і балок та значною крутизною схилів. Хоча близько 75 % крутосхилів займають ліси, що виконують ґрунтозахисну функцію, платоподібні ділянки та пологі схили зазнають інтенсивного антропогенного впливу.

Ґрунтовий покрив регіону відрізняється значною строкатістю, яка зумовлена зміною висотних відміток, експозиції схилів та типу рослинності (табл. 1). Під широколистими лісами на лесовидних породах сформувалися ясно-сірі та темно-сірі лісові ґрунти. На вирівняних плато переважають типові та опідзолені чорноземи. Типові чорноземи сягають потужності профілю до 130 см і накопичують близько 4-5 % гумусу. Опідзолені чорноземи та темно-сірі ґрунти містять від 3 % до 6 % органічної речовини. Природно низький вміст гумусу у сірих лісових ґрунтах у поєднанні з їхнім пилуватим гранулометричним складом робить їх вкрай нестабільними та схильними до заплівання, кіркоутворення й площинного змиву.

Таблиця 1.

Морфогенетичні та протиерозійні характеристики ґрунтів Хотинської височини

Table 1.

Morphogenetic and anti-erosion characteristics of the soils of the Khotyn Upland

Тип ґрунту (Soil type)	**Материнська порода (Parent material)**	**Вміст гумусу, % (Humus content, %)**	**Потужність гумусового горизонту, см (Thickness of humus horizon, cm)**	**Природна стійкість до водної ерозії (Natural resistance to water erosion)**
Типові чорноземи	Лесовидні суглинки	4,0-5,0	80-130	Висока
Опідзолені чорноземи	Лесовидні суглинки	3,0-6,0	60-90	Середня
Темно-сірі лісові	Лесовидні суглинки	3,0-5,0	40-60	Низька
Ясно-сірі лісові	Мергелі, леси	1,5-3,0	20-40	Дуже низька

Еколого-біологічна деградація ґрунтового покриву Хотинської височини виявляється насамперед у руйнуванні його біологічного екрана та пригніченні життєдіяльності ґрунтової мікробіоти на еродованих ділянках. На сільськогосподарських угіддях, що розташовані на схилах та зазнають інтенсивного площинного змиву, фіксуються критичні втрати органічної речовини, руйнування агрономічно цінної макроструктури ґрунту та погіршення його водно-фізичних властивостей. Безперервний антропогенний тиск у синергії зі сніговою ерозією під час різких весняних відлиг прискорюють мінералізацію гумусу та призводять до зменшення пулу мікробної біомаси, що нівелює здатність агроекосистем до самовідновлення. Особливо гостро ця проблема постає на ділянках, які залишаються відкритими і повністю незахищеними від впливу поверхневого стоку.

З огляду на масштабність та швидкоплинність цих деструктивних процесів, об'єктивізація еколого-біологічної оцінки деградації ґрунтового покриву потребує залучення методів дистанційного моніторингу. Водночас використання непрямих індикаторів екологічного стану, зокрема аналізу просторово-часових змін рослинного покриву (NDVI), рівня зволоження (NDMI) та ступеня оголеності ґрунту (BSI), суттєво посилює та обґрунтовує таку оцінку. Застосування цих мультиспектральних індексів дає змогу не лише безперервно фіксувати стан біологічного щита ландшафтів, а й з високою точністю локалізувати осередки критичного ерозійного ризику на деградованих крутосхилах.

Для вивчення просторової динаміки ерозійної схильності застосувано дані оптичного дистанційного зондування Землі, отримані із супутників Sentinel-2 європейської космічної програми Copernicus (European Space Agency, 2015–2023). Інструментарій Sentinel-2 (MultiSpectral Instrument - MSI) забезпечує зйомку у 13 спектральних каналах із просторовою роздільною здатністю 10 м для видимого та ближнього інфрачервоного діапазонів. Використано набори даних рівня обробки Level-2A (L2A). Цей алгоритм обробки надає значення відбивної здатності на рівні нижньої межі атмосфери (Bottom of Atmosphere, BOA), що ефективно нівелює атмосферні спотворення, розсіювання світла аерозолями та дозволяє коректно порівнювати піксельні значення знімків за різні роки.

Період зйомки охоплює березень 2020 року (знімки за 19.03.2020) та березень 2026 року (знімки за 15.03.2026). Вибір ранньовесняного періоду зумовлений його критичним значенням для оцінки ерозійної небезпеки. Саме в цей час сніговий покрив сходить, ґрунти перебувають у стані максимального перезволоження, а вегетація озимих культур або природної трав'яної рослинності лише розпочинається і не забезпечує достатнього проективного покриття. Поверхня ріллі залишається відкритою, що дозволяє оптичним сенсорам максимально точно ідентифікувати площі потенційного площинного змиву, позбавлені біологічного екрана.

Дослідження спирається на чотири аналітичні зрізи, які опрацювано за допомогою сучасних геоінформаційних інструментів:

1. Візуальний та метричний аналіз оптичних композитів (Custom composites). Для візуальної ідентифікації відкритих ґрунтів, вологовмісту та стану рослинності синтезовано композитні зображення у умовних кольорах із використанням двох специфічних комбінацій каналів Sentinel-2. Перша комбінація - B11-B08-B02 (короткохвильовий інфрачервоний SWIR-1, ближній інфрачервоний NIR та синій Blue канали), яка ефективно виділяє рівень поверхневої зволоженості ґрунту та межі здорової вегетації. Друга комбінація - B12-B08-B04 (короткохвильовий інфрачервоний SWIR-2, ближній інфрачервоний NIR та червоний Red канали), що забезпечує чітку диференціацію між структурно деградованим оголеним ґрунтом, лісовими масивами та сільськогосподарськими угіддями. Коричневі, червонуваті та теракотові відтінки на таких знімках безпосередньо маркують оголений ґрунт, позбавлений рослинних залишків та надзвичайно схильний до водної ерозії.

2. Розрахунок та класифікація нормалізованого диференційного вегетаційного індексу (NDVI). Алгоритм обчислює нормалізовану різницю між відбиттям у ближньому інфрачервоному (NIR, канал B08) та червоному (Red, канал B04) діапазонах за класичною формулою:

$$NDVI = \frac{NIR - Red}{NIR + Red}$$

Значення індексу варіюють від -1 до 1 (Мисько, 2016). Отримані растри сегментовано на зони протиерозійної стійкості. Зелені відтінки на картах відповідають значенням понад 0,2 (наявність активної рослинності, яка скріплює ґрунт), тоді як жовті та бліді кольори маркують ділянки з мінімальним проективним покриттям (табл. 2).

Таблиця 2.

Шкала класифікації значень NDVI для оцінки протиерозійної стійкості агроландшафтів

Table 2.

NDVI classification scale for assessing the anti-erosion resistance of agricultural landscapes

Діапазон значень NDVI (NDVI value range)	**Візуальне відображення на карті (Visual representation on the map)**	**Характеристика поверхні (Surface characteristics)**	**Рівень протиерозійної стійкості (Level of anti-erosion resistance)**
< 0,1	Жовтий, прозорий	Відкритий оброблений ґрунт, рілля без рослинних залишків	Нульовий (Критична небезпека)
0,1-0,2	Блідо-зелений	Початкова стадія сходів озимини, розріджена стерня	Низький
0,2-0,4	Світло-зелений	Активна вегетація агроценозів, луки	Середній
> 0,4	Темно-зелений	Густі лісові масиви, щільний травостій	Високий

3. Розрахунок нормалізованого індексу вологості (NDMI). Цей показник розраховується як нормалізована різниця між ближнім інфрачервоним (NIR, канал B08) та короткохвильовим інфрачервоним (SWIR, канал B11) каналами за формулою:

$$NDMI = \frac{NIR - SWIR}{NIR + SWIR}$$

NDMI використано для оцінки водного стресу, вмісту вологи в ґрунті та рослинному покриві.

4. Розрахунок індексу оголеного ґрунту (BSI) та аналіз структурно-текстурних чорно-білих масок (Grayscale). Алгоритм BSI комбінує канали SWIR (канал B11), Red (канал B04), NIR (канал B08) та Blue (канал B02) за формулою:

$$BSI = \frac{(SWIR + Red) - (NIR + Blue)}{(SWIR + Red) + (NIR + Blue)}$$

Виділення контурів оголених ґрунтів формує висококонтрастну бінарну градацію, де найінтенсивніші зони відповідають ділянкам із повністю відсутнім біологічним захистом, а інші - територіям із рослинним покривом або пожнивними залишками. Аналіз цих масок дозволяє математично точно виділити контури розростання яружно-балкової мережі.

Здійснено просторове накладання векторних меж Хотинської височини на растрові дані та виконано поканальне порівняння зображень 2020 та 2026 років, що дозволило зафіксувати зміщення площ оголених ґрунтів відносно елементів рельєфу.

Для просторового моделювання ерозійного ризику оптичні супутникові дані було інтегровано з цифровою моделлю рельєфу (Copernicus DEM). У ГІС-середовищі (QGIS) на основі DEM розраховано морфометричні параметри: крутизну схилів (Slope) та мережу акумуляції поверхневого стоку (Flow Accumulation) за допомогою алгоритму r.watershed. Шляхом просторового накладання (overlay) топографічних параметрів та маски критично оголеного ґрунту (за індексом BSI) було ідентифіковано осередки максимальної ерозійної небезпеки - ділянки, де відсутність рослинного покриву збігається з ерозійно небезпечними ухилами та тальвегами стоку.

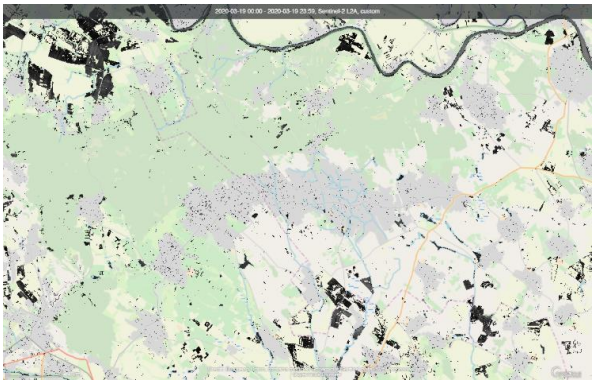
Результати та їх обговорення. Аналіз супутникових зображень Хотинської височини яскраво демонструє глибоку структурну розчленованість поверхні. Складна мережа водозборів формує інтенсивний поверхневий стік, який швидко спрямовується до басейнів Пруту та Дністра. Горбисто-пасмові ерозійно-зсувні схилові місцевості виступають домінуючим елементом ландшафту. На оптичних зображеннях ці форми рельєфу чітко ідентифікуються завдяки тіньовим контрастам та нерівномірному розподілу лісової рослинності. Букові та дубово-грабові праліси індикативно займають найбільш круті схили, утворюючи природний бар'єр для поверхневих вод.

Однак значна частина хвилястих межиріч та пологих схилів перебуває під інтенсивним сільськогосподарським пресом. Дослідники ґрунтознавчої школи наголошують, що сучасні системи землеробства з використанням важкої техніки та порушенням принципів ґрунтозахисної обробки провокують критичне ущільнення орного горизонту. Ущільнення призводить до різкого падіння коефіцієнта фільтрації води. Під час весняного танення снігу та інтенсивних дощів вода не проникає у глибші ґрунтові горизонти, а швидко формує потужний поверхневий стік. Зважаючи на наявність легкорозмивних лесовидних суглинків, цей стік ініціює катастрофічну площинну та лінійну ерозію. Науковці оцінюють середньорічні втрати ґрунтової маси для еродованих територій Чернівецької області на рівні 1,8 т/га (Буджак, 2025). Кут нахилу фронтальної поверхні впливає на швидкість потоку: навіть мінімальні нахили понад 1 ° здатні ініціювати мікрострумки, які згодом переростають у вимоїни та яри. Ерозія зупиняється лише тоді, коли поверхня стає абсолютно рівною або коли потік досягає місцевого базису ерозії (Вітвіцький, Гаськевич, 2022).

Для просторової ідентифікації цих ерозійних загроз та оцінки реальних масштабів деградації здійснено детальне порівняння оптичних композитів (Custom) за березень 2020 та березень 2026 років. Отримані супутникові дані дозволяють чітко візуалізувати зміни у структурі землекористування та фізичному стані поверхні агроландшафтів у найбільш критичний ранньовесняний період.

Передусім, рівень зволоженості території визначає інтенсивність поверхневого стоку. Аналіз нормалізованого індексу вологості (NDMI) розкриває загальну картину розподілу вологи в агроландшафтах (рис. 2).

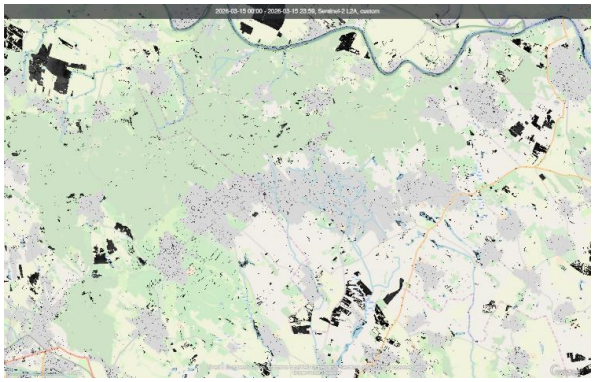
На відміну від засушливішого періоду 2020 року, картки NDMI фіксують зменшення площ із критично низькими показниками вологості на більшості масивів у 2026 році. Проте на тих окремих ділянках, які залишилися повністю відкритими та позбавленими рослинного покриву, швидке пересихання поверхні суттєво знижує опірність ґрунту як до водного змиву, так і до дефляції (вітрової ерозії).



а

Рис. 2. Просторовий розподіл нормалізованого індексу вологості (NDMI) на території Хотинської височини: а - 19 березня 2020; б - 15 березня 2026

Примітка: світлі (бліді) відтінки - низький рівень вологості ґрунту та рослинності (водний стрес); більш насичені/темні відтінки - вищий рівень вологості; чорні контури - гідрологічні об'єкти



б

Fig. 2. Spatial distribution of the Normalized Difference Moisture Index (NDMI) in the Khotyn Upland: a - March 19, 2020; b - March 15, 2026

Note: light (pale) shades - low level of soil and vegetation moisture (water stress); more saturated/darker shades -higher moisture level; black contours - hydrological objects

Сірі лісові ґрунти, які від природи мають дуже низький вміст гумусу (до 3 %), за умови локального дефіциту вологи та нульового біологічного захисту (NDVI) втрачають агрономічно цінну структуру. Ґрунтові агрегати на таких платах розпадаються, поверхня ущільнюється, блокуючи газообмін, і перетворюється на пилуватий субстрат, який легко змивається у річкові долини під час перших інтенсивних весняних злив.

Окрім цього, аналіз синтезованих зображень у комбінації каналів B11-B08-B02, яка є високочутливою до хлорофілу та вологи, демонструє просторові відмінності між двома періодами (рис.3). На знімку за 19 березня 2020 року просторова конфігурація демонструє переважання буро-коричневих і теракотових тонів на значній площі полів. Натомість на знімку за 15 березня 2026 року фіксується розширення зелених та жовто-зелених спектральних відтінків, що свідчить про більш ранній розвиток ранньовесняної вегетації у 2026 році.

Також протиерозійна стійкість поверхні безпосередньо залежить від показників рослинного покриву, який виконує роль біологічного щита. Динаміка площ безпосередньо відкритого ґрунту детальніше візуалізується за допомогою комбінації каналів B12-B08-B04, де оголені ділянки спектрально відображаються темно-коричневим, теракотовим та червонуватим кольорами (рис.4).



а

Рис. 3. Порівняння оптичних композитних зображень (комбінація каналів B11-B08-B02) Хотинської височини за даними Sentinel-2 L2A:а - 19 березня 2020; б - 15 березня 2026

Примітка: зелені та світло-зелені відтінки - активна вегетація (лісові масиви, сходи озимих); бурі, коричневі та теракотові відтінки - відкритий (оголений) ґрунт; темні/чорні контури - водні об'єкти



б

Fig. 3. Comparison of optical composite images (B11-B08-B02 band combination) of the Khotyn Upland based on Sentinel-2 L2A data: a - March 19, 2020; b - March 15, 2026

Note: green and light green shades - active vegetation (forests, winter crops); brown, and terracotta shades - bare soil; dark/black contours - water bodies



а

Рис. 4. Порівняння оптичних композитних зображень (комбінація каналів B12-B08-B04) Хотинської височини за даними Sentinel-2 L2A: а - 19 березня 2020 р.; б - 15 березня 2026 р.

Примітка: темно-коричневі, теракотові та червонуваті відтінки - ділянки відкритого (оголеного) ґрунту; зеленуваті відтінки - рослинний покрив; темні лінії - гідрологічна мережа



б

Fig. 4. Comparison of optical composite images (B12-B08-B04 band combination) of the Khotyn Upland based on Sentinel-2 L2A data: a - March 19, 2020; b March 15, 2026.

Note: dark brown, terracotta, and reddish shades - areas of bare soil; greenish shades - vegetation cover; dark lines - hydrological network

У 2020 році ділянки відкритого ґрунту охоплювали більші масиви переважно на вирівняних платоподібних ділянках. У 2026 році просторовий розподіл змінюється, проте на схилових землях та в балочних комплексах зберігається висока пелюстковість. Крім того, на знімках 2026 року фіксується дрібніша фрагментація окремих земельних ділянок: у балках та долинах дрібних водотоків простежується посилення спектрального контрасту між обробленою ріллею та залишками прибережно-захисних смуг. Активне розорювання схилів аж до брівок балок стимулює розростання ярів, формування суфозійних лійок та утворення локальних зсувів, які є характерними для цього геоморфологічного району.

Експансія відкритого ґрунту у весняний період становить абсолютну загрозу. Снігова ерозія, що виникає внаслідок швидкого танення покриву, спричиняє перенасичення розпушеного ґрунту водою. Відсутність кореневих систем та наземної біомаси на незадернених ділянках залишає сірі лісові ґрунти Хотинської височини повністю незахищеними перед кінетичною енергією крапель весняних дощів. Краплинна ерозія розбиває ґрунтові агрегати, закупорює пори дрібними частками і створює водонепроникну кірку, яка ще більше посилює поверхневий стік.

Аналіз карт NDVI надає об’єктивне кількісне підтвердження стану біологічного щита ландшафту (рис.5). Карта NDVI за 19 березня 2020 року фіксує стабільний темно-зелений фон (NDVI > 0,4) для лісових екосистем Хотинської височини, однак на значній частині сільськогосподарських угідь переважають жовті та блідо-зелені відтінки (NDVI < 0,2). Це свідчить про майже повну відсутність активної вегетації на ріллі на початку весни у 2020 році, що є типовим для цього сезону, але залишає ґрунти вкрай вразливими до водної ерозії в період танення снігу та інтенсивних опадів.

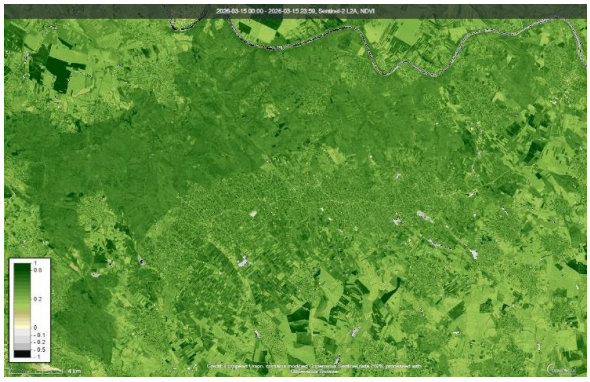
Натомість карта NDVI за 15 березня 2026 року демонструє суттєве підвищення середнього показника вегетації на багатьох агроценозах. Величезні масиви, які у 2020 році мали майже нульовий NDVI (відображені жовтими ділянками), у 2026 році перетворилися на зони з помірно зеленим фоном (NDVI 0,2-0,4). Таке різке збільшення проективного покриття тісно корелює з глобальними кліматичними флуктуаціями - зокрема, теплішими зимами та аномально раннім настанням весняного вегетаційного періоду для озимих культур. Однак, незважаючи на загальне «позеленіння» значних площ плато, детальний просторовий аналіз виявляє критичну проблему: масиви, які у 2026 році залишилися під відкритим ґрунтом (відображені прозорими/білими плямами з NDVI < 0,1), різко контрастують із загальним фоном. Ці повністю оголені ділянки, значна частина яких розташована на схилах балок, позбавлені кореневої системи та біологічного екрана. В умовах інтенсивних ранньовесняних злив саме ці локалізовані зони відкритого ґрунту зазнають найвищого ризику катастрофічного площинного змиву, оскільки поверхневий стік концентрується на незахищених ділянках рельєфу. Монохромні індексні зображення (у градаціях сірого) на основі індексу оголеності BSI за 2020 та 2026 роки відіграють роль високоточного інструмента для ідентифікації текстурної неоднорідності ландшафту (рис.6).



а

Рис. 5. Просторовий розподіл нормалізованого вегетаційного індексу (NDVI) на території Хотинської височини: а - 19 березня 2020; б -15 березня 2026

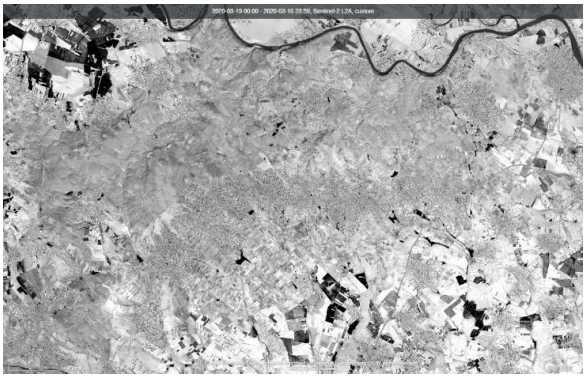
Примітка: темно-зелені відтінки (NDVI > 0,4) - густа лісова рослинність; світло-зелені (0,2-0,4) - активна вегетація агроценозів; жовті та блідо-зелені (0,1-0,2) – розріджена рослинність; прозорі/білі плями (NDVI < 0,1) – повністю оголений ґрунт



б

Fig. 5. Spatial distribution of the Normalized Difference Vegetation Index (NDVI) in the Khotyn Upland: a - March 19, 2020; b - March 15, 2026

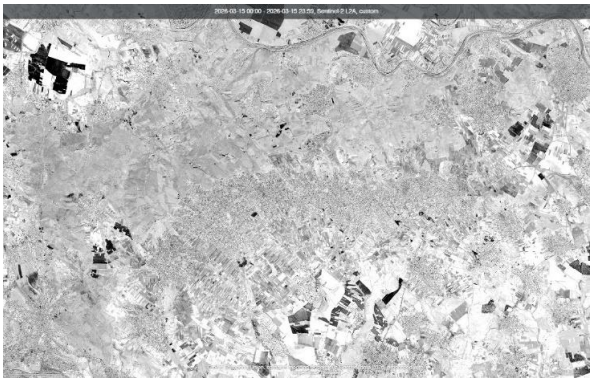
Note: dark green shades (NDVI > 0.4) - dense forest vegetation; light green (0.2-0.4) - active vegetation of agrocenoses; yellow and pale green (0.1-0.2) - sparse vegetation; transparent/white spots (NDVI < 0.1) – completely bare soil



а

Рис. 6. Порівняння монохромних зображень індексу оголеності ґрунту (BSI) Хотинської височини за даними Sentinel-2 L2A: а - 19 березня 2020; б - 15 березня 2026

Примітка: світлі та білі ділянки (високий контраст) - повністю відкритий (оголений) ґрунт із високою відбивною здатністю (індикатори деградації); сірі та темні ділянки - поверхня, захищена рослинним покривом



б

Fig. 6. Comparison of monochrome Bare Soil Index (BSI) images of the Khotyn Upland based on Sentinel-2 L2A data: a - March 19, 2020; b -March 15, 2026

Note: light and white areas (high contrast) - completely bare soil with high reflectance (degradation indicators); gray and dark areas - surface protected by vegetation cover

Аналіз зображення за 2020 рік виявляє значну кількість висококонтрастних світлих ділянок, що відповідає масовому оголенню ґрунтів до початку активної вегетації. Натомість загальна картина на зображенні за 2026 рік виглядає більш однорідною завдяки аномально ранньому розвитку рослинного покриву. Проте саме ті висококонтрастні ділянки, які збереглися світлими на знімку 2026 року, є ключовими індикаторами підвищеної деградації.

У контексті ґрунтознавства збереження високої відбивної здатності відкритих ділянок (світлі пікселі на темному тлі) в умовах загального початку вегетації може сигналізувати про можливе вимивання верхнього гумусованого горизонту та ймовірне оголення ілювіальних горизонтів або безпосередньо материнської породи (карбонатних мергелів чи світлих лесів). На таких ділянках імовірно знижується ґрунтозахисна функція та значно погіршуються умови для проростання насіння.

Тривала водна ерозія докорінно трансформує фізико-хімічні параметри ґрунтового профілю. Відбувається просторова сегрегація ґрунтових часток, втрата водотривкої макроструктури та вимивання дрібнодисперсної мулистої фракції та

вимивання органічного детриту, який забезпечує пористість. Зникнення акумулятивного шару не лише катастрофічно погіршує родючість полів, а й порушує глобальні біогеохімічні цикли. Деградовані ґрунти втрачають здатність до секвестрації діоксиду вуглецю, перетворюючись із поглиначів вуглецю на його джерело, що додатково посилює парниковий ефект. Чітка ідентифікація таких структурно зруйнованих ґрунтів (залишкових світлих пікселів) на знімках BSI 2026 року свідчить про наявність можливих осередків деградації, які потребують польової верифікації та першочергових ґрунтозахисних заходів.

Окрім фізико-хімічної деструкції, тривала відсутність живого рослинного екрана та зниження значень вегетаційного індексу NDVI безпосередньо вказують на падіння первинної продуктивності біомаси агроценозів і припинення надходження свіжого органічного детриту. На незахищених схилових ділянках це призводить до критичної деструкції поверхневих біологічних плівок, порушення умов життєдіяльності ґрунтової мікробіоти, зменшення пулу мікробної біомаси та неминучої втрати біорізноманіття агрофітоценозів. Зазначені процеси прискорюють мінералізацію гумусу та підривають загальний біологічний потенціал і самоочищувальну здатність ґрунтового покриву регіону.

Для об’єктивної кількісної оцінки динаміки стану ґрунтового покриву та ерозійної небезпеки було проведено просторовий аналіз растрових даних із підрахунком площ. Результати класифікації за нормалізованим вегетаційним індексом (NDVI) та індексом оголеності ґрунту (BSI) наведено у таблиці 3.

Таблиця 3.

Динаміка площ агроландшафтів Хотинської височини за показниками ерозійної небезпеки (за даними Sentinel-2)

Table 3.

Dynamics of the areas of agricultural landscapes of the Khotyn Upland according to erosion hazard indicators (based on Sentinel-2 data)

Показник ерозійної небезпеки	**2020 рік, га**	**2026 рік, га**	**Зміна (+/–), га**
NDVI < 0,1 (повністю оголений ґрунт)	4 067	2 598	-1 469
NDVI 0,1–0,2 (розріджена рослинність)	7 308	12 627	+5 319
NDVI > 0,2 (активна вегетація)	106 101	102 251	-3 850
BSI > 0,2 (високий ступінь оголеності поверхні)	3 603	1 224	-2 379

Аналіз отриманих кількісних даних (табл. 3) підтверджує візуальні спостереження. У 2020 році площа повністю оголених ґрунтів (NDVI < 0,1), які не мали жодного біологічного захисту, становила 4 067 га, з яких 3 603 га вирізнялися надзвичайно високим ступенем оголеності поверхні (BSI > 0,2). У 2026 році внаслідок аномально раннього старту весняної вегетації площа повністю відкритого ґрунту скоротилася до 2 598 га, натомість суттєво розширилися ареали земель із показником NDVI 0,1–0,2. Збереження у 2026 році висококонтрастних ділянок без рослинного покриву (понад 1,2 тис. га за індексом BSI) свідчить про наявність стійких осередків, що потребують уваги. Саме ці території виступають головними зонами ерозійного ризику, де необхідне першочергове впровадження ґрунтозахисних заходів.

Отримані просторові дані за всіма проаналізованими індикаторами узагальнено у зведеній таблиці (табл. 4), яка відображає комплексну динаміку змін у ландшафтах між 2020 та 2026 роками.

Як свідчать узагальнені результати моніторингу (табл. 4), виявлені індикатори зростаючої ерозійної небезпеки ґрунтів Хотинської височини не обмежуються виключно падінням рентабельності агровиробництва. Ці процеси формують пряму загрозу загальній екологічній стабільності всього Прут-Дністровського межиріччя. Змив ґрунтової маси тягне за собою замулення дрібних водотоків, зміну локального мікроклімату, деградацію середовищ існування для місцевої флори та фауни, а також руйнування зимових і літніх біотопів. Землі, поверхня яких порушена інтенсивною водною ерозією, втрачають здатність виконувати свої екосистемні функції.

Таблиця 4.

Зведена матриця результатів багатопакетного супутникового моніторингу агроландшафтів Хотинської височини

Table 4.

Summary matrix of multi-package satellite monitoring results of the agricultural landscapes of the Khotyn Upland

Індикатор / Метод (Indicator / Method)	**Березень 2020 року (March 2020)**	**Березень 2026 року (March 2026)**	**Вектор змін та екологічна оцінка (Vector of changes and ecological assessment)**
Комбінація B11-B08-B02 (хлорофіл і волога)	Переважання буро-коричневих тонів на більшій частині площ	Помітне поширення зелених і жовто-зелених відтінків	Фіксація ранньовесняного позеленіння на тлі кліматичних аномалій
Комбінація B12-B08-B04 (оголений ґрунт)	Оголені масиви переважно на вирівняних платоподібних ділянках	Збереження високої пелюстковості та фрагментації на схилах	Виявлення локальних зон підвищеного ерозійного ризику
Нормалізований індекс вегетації (NDVI)	Низькі значення ($< 0{,}2$) на значній частині ріллі	Зростання площ із помірним фоном ($0{,}2 - 0{,}4$)	Збільшення проективного покриття завдяки ранній вегетації озимих
Індекс вологості (NDMI)	Наявність виражених зон водного стресу та низької вологості	Зменшення площ із критичним дефіцитом вологи	Кращий загальний гідротермічний фон із локальним ризиком пересихання відкритих ділянок
Маска оголеності BSI (Grayscale)	Чіткі контури полів, масове оголення ґрунту	Висока фрагментація, збереження локальних світлих плям	Ідентифікація стійких осередків структурної деградації та вимивання гумусу

На завершальному етапі, щоб перейти від загальної констатації цих екологічних загроз до точної просторової локалізації епіцентрів змиву, суто спектральний аналіз було доповнено геоінформаційним моделюванням. Залучення цифрової моделі рельєфу дозволило подолати ключове обмеження двовимірних оптичних знімків. Оскільки Хотинська височина відзначається глибоким ерозійно-тектонічним розчленуванням та наявністю розгалуженої яружно-балкової мережі, сама лише відсутність рослинного покриву не є вичерпним індикатором деградації - вирішальне значення має геоморфологічна позиція ділянки.

Для об'єктивізації загрози було здійснено просторове накладання маски низького проективного покриття ґрунту (BSI) на карту ухилів та змодельовану мережу акумуляції стоку. На розробленій Карті потенційних осередків ерозійної небезпеки (рис. 7) світло-сірі градації відображають морфологію та крутизну схилів, а темні капілярні лінії маркують шляхи формування та концентрації поверхневого стоку під час інтенсивних опадів чи сніготанення.

Червоним кольором на карті просторово візуалізовано епіцентри високого ерозійного ризику - переважно відкриті орні землі (індекс BSI > 0,2), які безпосередньо розташовані на схилових поверхнях та перетинаються з тальвегами водного потоку. З фізико-географічної точки зору, саме в цих зонах відбувається накладання трьох деструктивних факторів: відсутність біологічного екрана значно знижує захищеність ґрунту від краплинної ерозії, крутий ухил надає поверхневим водам високої кінетичної енергії, а лінії акумуляції стоку створюють передумови для переходу площинного змиву в лінійний розмив.

Виявлена на карті просторова синергія деструктивних факторів наочно доводить, що вирішення цієї комплексної проблеми вимагає негайної трансформації підходів до землекористування та впровадження науково обґрунтованих ґрунто- і ресурсоощадних технологій. Провідні ґрунтознавці обґрунтовують безальтернативність переходу до систем безполицевого обробітку ґрунту (no-till, mini-till), які дозволяють зберігати пожнивні залишки на поверхні, формуючи штучний мульчуючий шар. Цей шар ефективно захищає агрегати від прямої кінетичної дії крапель дощу та утримує вологу. Водночас, як підтверджують отримані нами моделі поверхневого стоку, надзвичайно важливо оптимізувати просторову структуру угідь: крутосхили з кутом нахилу понад 5 градусів доцільно першочергово вилучати з інтенсивного орного обробітку, переводити у стан постійних пасовищ, луків або заліснювати (Шарий, Нестеренко, 2020).

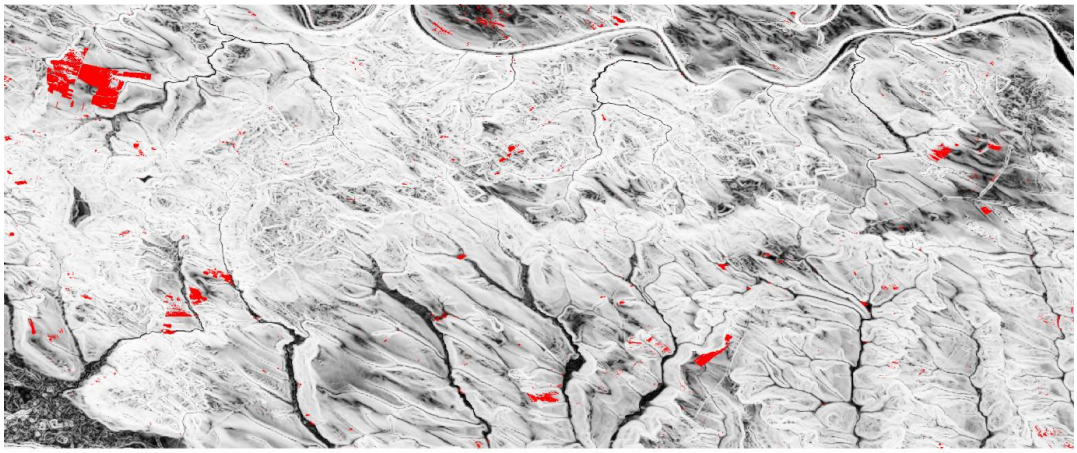


Рис. 7. Карта критичних осередків ерозійної небезпеки Хотинської височини

Примітка: Побудована на основі просторової інтеграції маски оголеного ґрунту (BSI, Sentinel-2) та параметрів рельєфу (Slope, Flow Accumulation, Copernicus DEM). Червоним кольором виділено зони збігу відкритої ріллі з крутими схилами та лініями стоку

Fig. 7. Map of critical erosion hazard hotspots in the Khotyn Upland.

Note: Built based on the spatial integration of the bare soil mask (BSI, Sentinel-2) and relief parameters (Slope, Flow Accumulation, Copernicus DEM). Red color highlights zones where open arable land coincides with steep slopes and flow lines

Геоінформаційні системи та предикативне моделювання відіграють вирішальну роль у плануванні цих заходів. Інтеграція даних дистанційного зондування, таких як проаналізовані нами знімки Sentinel-2, дозволяє з високою роздільною здатністю ідентифікувати ділянки максимального ерозійного ризику. Створення цифрових моделей рельєфу у поєднанні з оптичними індексами (NDVI, NDMI, BSI) формує надійний базис для розробки проектів контурно-меліоративної організації території державних сільськогосподарських підприємств та приватних фермерських господарств. Лише комплексний підхід, що поєднує космічний моніторинг, біогеохімічну оцінку та біологічне землеробство, здатен мінімізувати ризики деградації та зберегти унікальні ґрунти Буковини.

Висновки. Проведене дослідження просторової динаміки ґрунтового покриву Хотинської височини за допомогою мультиспектральних супутникових знімків Sentinel-2 L2A свідчить про високий рівень ерозійної схильності та наявність індикаторів, що вказують на прогресуючу деградацію агроландшафтів регіону. Детальний порівняльний аналіз картографічних матеріалів ранньовесняного періоду 2020 та 2026 років засвідчив високу фрагментацію проективного рослинного покриву, кліматично зумовлені відмінності у стані вегетації та наявність стійких, критично оголених ділянок на схилових землях. Складна геоморфологічна будова височини, яка характеризується глибоким розчленуванням, значними кутами нахилу поверхні та домінуванням легкорозмивних лесовидних порід, у синергії з інтенсивним сільськогосподарським обробітком провокує активний розвиток водної ерозії, інтенсивний площинний змив та потенційну втрату гумусованого горизонту.

Застосування комплексного ГІС-моделювання, що поєднує оптичні індекси з морфометричним аналізом рельєфу (ухили та акумуляція стоку), дозволило створити об'єктивну просторову модель ерозійної небезпеки. Встановлено, що критичні осередки ризику просторово приурочені до орних земель на крутосхилах, які перетинаються з основними лініями концентрації поверхневого стоку, що доводить нагальну потребу вилучення таких земель з інтенсивного обробітку. Тривала відсутність живого рослинного покриву та зниження значень NDVI у таких зонах призводять до припинення надходження свіжого органічного детриту, руйнування мікробіологічних плівок і різкого пригнічення первинної біологічної продуктивності агрофітоценозів, що супроводжується зменшенням пулу мікробної біомаси та прискоренням мінералізації гумусу.

Отримані результати підкреслюють нагальну необхідність кардинального перегляду традиційних підходів до землекористування в межах Прут-Дністровського межиріччя. Для пом’якшення руйнівних наслідків деградації та збереження екологічної стійкості потрібно ширше впроваджувати технології мінімального безполицевого обробітку ґрунту, створювати широкі буферні рослинні смуги та безапеляційно

вилучати деградовані крутосхили з інтенсивної оранки. Інтеграція матеріалів дистанційного зондування з предикативним ґрунтовим картографуванням забезпечує потужний інструментарій для безперервного моніторингу, що дозволить своєчасно виявляти критичні осередки ерозії та оперативно реагувати на виклики кліматичних змін. Водночас виявлені супутникові індикатори та просторово локалізовані осередки ерозійного ризику створюють надійний фундаментальний базис для організації подальшого наземного біологічного та ґрунтово-екологічного моніторингу, зокрема для цільового відбору ґрунтових проб з метою оцінки мікробної біомаси, базального дихання, ферментативної активності та загального біорізноманіття деградованих агроландшафтів регіону.

Конфлікт інтересів. *Автори заявляють, що дослідження проводилося за відсутності будь-яких комерційних або фінансових відносин, які можна було б витлумачити як потенційний конфлікт інтересів.*

Список літератури:

1. Балюк, С. А., Товажнянський, Л. Л. (Ред.). (2010). *Наукові та прикладні основи захисту ґрунтів від ерозії в Україні: монографія*. НТУ «ХПІ», 332–338.
2. Буджак, Т. В. Антропогенний вплив на деградацію ґрунтового покриву Хотинської височини. *Науковий вісник Чернівецького університету. Біологія (Біологічні системи)*, 2025. Т. 17, Вип. 1. С. 179-188. https://doi.org/10.31861/biosystems2025.01.179
3. Вітвіцький, Я., Гаськевич, В. (2022). Переущільнення чорноземів Придністерської височини в умовах агротехнічного навантаження. *Наукові записки Тернопільського національного педагогічного університету імені Володимира Гнатюка. Серія: географія*, 53(2), 27–35. https://doi.org/10.25128/2519-4577.22.2.4
4. Волощук, М. (2017). Деградація ґрунтів – глобальна екологічна проблема. *Вісник Львівського університету. Серія географічна*, 51, 63–70. https://doi.org/10.30970/vgg.2017.51.8738
5. Коржик, В. П., Чорней, І. І., Скільський, І. В., Буджак, В. В., Токарюк, А. І., Никирса, Т. Д., Смірнов, Н. А., Годованець, Б. Й., Бучко, В. В., Мелещук, Л. І. (2012). *Хотинська височина*. ДрукАрт, 336 с. https://www.researchgate.net/publication/292972537_Hotinska_visocina_Khotyn_height_in_Ukrainian
6. Костюк, У., Рідуш, Б. (2023). Літолого-стратиграфічні умови закарстування сульфатної товщі міоцену північно-західних схилів Хотинської височини (околиці с. Погорилівка). *Науковий вісник Чернівецького університету: Географія*, 845, 88–100. https://doi.org/10.31861/geo.2023.845.88-100
7. Мисько, К. А. (2016). Переваги використання NDVI при прогнозуванні ерозійної небезпеки. *Часопис картографії*, 16, 192–203. http://nbuv.gov.ua/UJRN/ktvsh_2016_16_19
8. Шарий, Г. І., Нестеренко, С. В., Щепак, В. В. (2020). Органічне землеробство як інструмент охорони ґрунтів. У *Формування сталого землекористування: проблеми та перспективи: збірник наукових праць* (с. 74–77). Полтава.
9. Шевченко, О. В., Пронь, О. С., Чеботарьова, І. В. (2024). Вплив кліматичних змін на деградацію земель та агроекосистем. *Збалансоване природокористування*, 3, 116–124. https://doi.org/10.33730/2310-4678.3.2024.314921
10. Achasov, A., Achasova, A., Siedov, A., Seliverstov, O. (2025). Geoinformation modeling of the risk of water erosion of soils. In *XVIII International Scientific Conference "Monitoring of Geological Processes and Ecological Condition of the Environment"*. Kyiv. https://eage.in.ua/wp-content/uploads/2025/04/Mon25-015.pdf
11. European Space Agency. (2015–2023). *Sentinel-2 MSI – MultiSpectral Instrument data*. Copernicus Open Access Hub. https://dataspace.copernicus.eu/
12. Trofymenko, P., Myslyva, T., Bezhodkova, Yu., Trofimenko, N., Lyashenko, D., Balaev, A. (2023). Assessment on the scale on soil erosion in the agrolandscapes on the Forest-Steppe on Ukraine according to the RUSLE model. In *XV International Scientific Conference "Monitoring of Geological Processes and Ecological Condition of the Environment"*. https://doi.org/10.3997/2214-4609.2023500024
13. Vakhnyak, V., Khomovyi, M., Trach, I., Yavorov, V., Petryshche, O. (2025). ("Mykhailo Khomovyi") The role of restoring degraded soils in ensuring food security in the agro-industrial sector. *Scientific Horizons*, 28(2), 73–88. https://doi.org/10.48077/scihor2.2025.73

References:

1. Baliuk, S.A., & Tovazhnianskyi, L.L. (Eds.). (2010). *Scientific and applied foundations of soil protection from erosion in Ukraine: monograph* [Naukovi ta prykladni osnovy zakhystu hruntiv vid erozii v Ukraini: monohrafiia]. NTU «KhPI», 332–338. [in Ukrainian].
2. Budzhak, T. V. (2025). Anthropogenic impact on soil cover degradation in the Khotyn Upland. *Scientific Bulletin of Chernivtsi University. Biology (Biological Systems)*, 17(1), 179-188 https://doi.org/10.31861/biosystems2025.01.179
3. Vitvitskyi, Ya., & Haskevych, V. (2022). Overcompaction of the Dniester upland chernozems under conditions of agrotechnical load [Pereushchilnennia chornozemiv Prydnisterskoi vysochyny v umovakh ahrotekhnichnoho navantazhennia]. *The Scientific Issues of Ternopil Volodymyr Hnatiuk National Pedagogical University. Series: Geography*, 53(2), 27–35. https://doi.org/10.25128/2519-4577.22.2.4. [in

Ukrainian].
4. Voloshchuk, M. (2017). Soil degradation as a global ecological problem [Dehradatsiia hruntiv – hlobalna ekolohichna problema]. *Visnyk of the Lviv University. Series Geography*, 51, 63–70. https://doi.org/10.30970/vgg.2017.51.8738. [in Ukrainian].
5. Korzhyk, V.P., Chorney, I.I., Skilsky, I.V., Budzhak, V.V., Tokariuk, A.I., Nykyrsa, T.D., Smirnov, N.A., Hodovanets, B.Y., Buchko, V.V., & Meleshchuk, L.I. (2012). *Khotyn Upland* [Khotynska vysochyna]. DrukArt, 336 p. https://www.researchgate.net/publication/292972537_Hotinska_visocina_Khotyn_height_in_Ukrainian. [in Ukrainian].
6. Kostiuk, U., & Ridush, B. (2023). Lithological and stratigraphic conditions of karstification of the Miocene sulphate strata of the north-western slopes of the Khotyn Upland (vicinity of the Pohorylivka village) [Litoloho-stratyhrafichni umovy zakarstuvannia sulfatnoi tovshchi miotsenu pivnichno-zakhidnykh skhyliv Khotynskoi vysochyny (okolytsi s. Pohorylivka)]. *Scientific Herald of Chernivtsi University: Geography*, 845, 88–100. https://doi.org/10.31861/geo.2023.845.88-100. [in Ukrainian].
7. Mysko, K.A. (2016). Advantages of using NDVI in predicting erosion hazard [Perevahy vykorystannia NDVI pry prohnozuvanni eroziinoi nebezpeky]. *Journal of Cartography*, 16, 192–203. http://nbuv.gov.ua/UJRN/ktvsh_2016_16_19. [in Ukrainian].
8. Sharyi, H.I., Nesterenko, S.V., & Shchepak, V.V. (2020). Organic farming as a tool for soil protection [Orhanichne zemlerobstvo yak instrument okhorony hruntiv]. In *Formation of sustainable land use: problems and prospects: collection of scientific works* (pp. 74–77). Poltava. [in Ukrainian].
9. Shevchenko, O.V., Pron, O.S., & Chebotarova, I.V. (2024). The impact of climate change on land and agroecosystems degradation [Vplyv klimatychnykh zmin na dehradatsiiu zemel ta ahroekosystem]. *Balanced Nature Using*, 3, 116–124. https://doi.org/10.33730/2310-4678.3.2024.314921. [in Ukrainian].
10. Achasov, A., Achasova, A., Siedov, A., & Seliverstov, O. (2025). Geoinformation modeling of the risk of water erosion of soils. In *XVIII International Scientific Conference "Monitoring of Geological Processes and Ecological Condition of the Environment"*. ("18th International Conference Monitoring of Geological Processes and ...") Kyiv. https://eage.in.ua/wp-content/uploads/2025/04/Mon25-015.pdf
11. European Space Agency. (2015–2023). *Sentinel-2 MSI – MultiSpectral Instrument data*. Copernicus Open Access Hub. https://dataspace.copernicus.eu/
12. Trofymenko, P., Myslyva, T., Bezhodkova, Yu., Trofimenko, N., Lyashenko, D., & Balaev, A. (2023). Assessment on the scale on soil erosion in the agrolandscapes on the Forest-Steppe on Ukraine according to the RUSLE model. ("Assessment on the Scale on Soil Erosion in the Agrolandscapes on the ...") In *XV International Scientific Conference "Monitoring of Geological Processes and Ecological Condition of the Environment"*. ("18th International Conference Monitoring of Geological Processes and ...") https://doi.org/10.3997/2214-4609.2023500024
13. Vakhnyak, V., Khomovyi, M., Trach, I., Yavorov, V., & Petryshche, O. (2025). ("Mykhailo Khomovyi") ("Mykhailo Khomovyi") The role of restoring degraded soils in ensuring food security in the agro-industrial sector. *Scientific Horizons*, 28(2), 73–88. https://doi.org/10.48077/scihor2.2025.73

ECOLOGICAL AND BIOLOGICAL ASSESSMENT OF SOIL ECOSYSTEM DEGRADATION AND EROSION RISKS IN THE KHOTYN UPLAND BASED ON SENTINEL-2 SPECTRAL DATA

T. V. Budzhak, I. I. Kazimir

Yuriy Fedkovych Chernivtsi National University,
Kotsiubynsky 2 Str., Chernivtsi 58012, Ukraine
budzhak.taras@chnu.edu.ua, i.kazimir@chnu.edu.ua

Soil cover functions as a fundamental component of terrestrial ecosystems; however, intensive agricultural development combined with complex geomorphological conditions causes its rapid degradation. We analyzed the current state, degradation level, and erosion susceptibility of soils in the Khotyn Upland (Chernivtsi region) using Earth remote sensing methods. The Khotyn Upland is characterized by deep erosional dissection, steep slopes, and the presence of loess-like deposits, which create an extremely high natural potential for water erosion development. The study is based on a comparison of Sentinel-2 L2A multispectral satellite images from March 2020 and March 2026 to identify spatiotemporal changes in vegetation cover and the degree of surface bareness. The Normalized Difference Vegetation Index (NDVI), Normalized Difference Moisture Index (NDMI), and Bare Soil Index (BSI) were calculated, along with specialized composite images that indicatively reflect the state of bare soil during the period of spring snowmelt and early spring precipitation, when the erosion hazard reaches its absolute maximum. The results demonstrate a significant transformation of agricultural landscapes: 2026 satellite data record high fragmentation and the persistence of critically

bare soils on steep slopes compared to 2020. Although the overall NDVI on arable lands increased in 2026 due to an anomalously early start of the vegetation season, the areas remaining under bare soil on slopes serve as indicators of increased erosion hazard and probable soil structure destruction. The obtained data confirm that the current land-use system, against the background of global climate change, multiplies sheet wash and humus loss, the intensity of which in the eroded areas of the region reaches 1.8 t/ha per year. The disappearance of the protective biological screen leads to the segregation of soil particles, the destruction of agronomically valuable aggregates, and the loss of organic matter. The article proves the urgent need to implement soil-protective and resource-saving tillage technologies, contour-reclamation farming, and continuous grassing of steep slopes. The proposed approach of utilizing integrated geoinformation models for continuous monitoring of erosion processes will optimize spatial land resource management in the Prut-Dniester interfluve. The research results establish a fundamental scientific basis for developing effective regional strategies for biodiversity conservation and restoring the fertility of degraded landscapes.

Keywords: water erosion, soil degradation, satellite indices, NDVI, agrocenoses, biological screen, microbial biomass, remote sensing, Sentinel-2, Khotyn Upland, Prut-Dniester interfluve

Отримано редколегією 09.09.2026 р.
Підписано до друку 15.10.2026 р.
Дата публікації 31.10.2026 р.

ORCID ID
Тарас Буджак: https://orcid.org/0009-0004-4993-2535
Іван Казімір: https://orcid.org/0000-0001-8362-4676