

УДК 504.064.3:528.8:553.97

### **В.Л. Расюн**

старший викладач, ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-2053-7561>

Кафедра геодезії, землевпорядкування та кадастру

Волинський національний університет імені Лесі Українки, проспект Волі, 13, Луцьк, Україна, 43025

### **О. В. Мельник\***

к.т.н., доцент, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-5429-4038>

Кафедра геодезії, землевпорядкування та кадастру

Волинський національний університет імені Лесі Українки, проспект Волі, 13, Луцьк, Україна, 43025

### **В.Ф. Радзій**

к.г.н., доцент, ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-8757-4944>

Кафедра геодезії, землевпорядкування та кадастру

Волинський національний університет імені Лесі Українки, проспект Волі, 13, Луцьк, Україна, 43025

\*автор-кореспондент, e-mail: [hockins@vnu.edu.ua](mailto:hockins@vnu.edu.ua)

## **Інтеграція даних Sentinel-2 та платформи Google Earth Engine для просторово-часового моніторингу територій торфовидобутку**

Цитувати як:

Расюн, В.Л., Мельник, О. В., Радзій, В.Ф. (2026) Інтеграція даних Sentinel-2 та платформи Google Earth Engine для просторово-часового моніторингу територій торфовидобутку. *Сучасні технології та методи розрахунків у будівництві*, 25, 178-196. [https://doi.org/10.36910/6775-2410-6208-2026-15\(25\)-14](https://doi.org/10.36910/6775-2410-6208-2026-15(25)-14)

© 2026, Автори. Публікується згідно рекомендацій ліцензії [CC BY 4.0](https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/)

*Анотація. У представленому дослідженні здійснено комплексний просторово-часовий аналіз екологічної трансформації та динаміки рослинного покриву родовища торфу "Коза-Березина" (Волинська область, Україна) під впливом антропогенного навантаження. З огляду на інтенсивне промислове освоєння торфовиць Українського Полісся, що неминуче супроводжується докорінною зміною гідрологічного режиму, деградацією природних біотопів, утворенням пухкого шару торфової крихти та підвищенням пожежної небезпеки, надзвичайно актуалізується потреба у безперервному кросмасштабному моніторингу таких територій. Метою роботи є кількісна та просторова оцінка масштабів деградації екосистеми внаслідок відкритого видобутку торфу, а також ідентифікація процесів природного відновлення флори (вторинних сукцесій) за 9-річний період (2017–2025 рр.).*

*Як основне джерело геопросторових даних використано багатоспектральні знімки високої просторової та часової розрізненості*

супутникової місії Sentinel-2. Обробка масивів даних здійснювалася у хмарному середовищі Google Earth Engine (GEE) та ГІС QGIS. Головним біофізичним індикатором стану та об'єму фітомаси виступав нормалізований різницевий вегетаційний індекс (NDVI). Для поглибленого просторового моделювання векторів розвитку екосистеми та візуалізації переходів площ між різними класами NDVI з року в рік було застосовано аналіз потоків за допомогою Санкей-діаграми.

Результати багаторічного моніторингу свідчать про гетерогенну реакцію болотної екосистеми на антропогенне втручання. Зафіксовано жорстку просторову локалізацію осередку екологічної деградації безпосередньо в зоні кар'єру (урочище Долина), де внаслідок зняття рослинного шару показники NDVI критично впали (нижче 0,1–0,2). Аналіз динаміки переходів підтверджує, що найвищий рівень деградації та просторового розширення площ із відкритим торфом припадає на 2023–2024 роки.

Водночас, дослідження виявило високу екологічну пластичність та потужний регенеративний потенціал фонові екосистеми родовища. Встановлено, що загальний лінійний тренд значень NDVI за весь досліджуваний період залишається стабільним із позитивним нахилом. Станом на 2025 рік територіальна експансія торфорозробки припинилася. Аналіз Санкей-діаграми чітко візуалізує макростабілізацію та висхідний тренд у кінці періоду: значні площі рослинності масово перейшли до вищих класів NDVI (0,8–1,0).

Встановлено, що інтеграція відкритих мультиспектральних оптичних даних Sentinel-2, можливостей платформи GEE та методів візуалізації динаміки переходів є об'єктивним, безпечним і високоєфективним підходом для екологічного контролю діючих торфородовищ, що дозволяє оптимізувати стратегії раціонального природокористування та управління водно-болотними угіддями.

*Ключові слова:* дистанційне зондування Землі (ДЗЗ), промислові торфовища, NDVI, мультиспектральні дані Sentinel-2, Google Earth Engine (GEE), динаміка рослинного покриву.

## **Вступ**

Торфовища — це унікальні водно-болотні екосистеми, які відіграють критичну роль у підтриманні екологічного балансу, збереженні ландшафтного біорізноманіття та регулюванні глобального клімату. Вони є найважливішими природними резервуарами, де постійно накопичується та зберігається величезна кількість вуглецю у вигляді рослинних залишків, що запобігає його викидам в атмосферу. Крім екологічної цінності, торф посідає особливе місце серед природних ресурсів як надійна альтернатива традиційним паливним енергоносіям (газу та вугіллю), а також є цінною сировиною для сільського господарства [1; 2]. Зважаючи на значні запаси торфу в Україні, особливо в зоні Полісся, ці території зазнають інтенсивного антропогенного навантаження через видобуток торфосировини [3].

Проте розробка та меліорація родовищ торфу супроводжуються низкою негативних наслідків. Порушення гідрологічного режиму зумовлює деградацію екосистем, зниження рівня ґрунтових вод, підсушення поверхні та втрату торфом здатності утримувати вологу. Це створює екстремальні умови для розвитку природної рослинності, призводячи до її заміни на маловидові синантропні (бур'янові) угруповання. Крім того, на меліорованих і порушених торфовищах різко підвищуються ризики виникнення довготривалих підземних пожеж, які завдають колосальних збитків довкіллю та супроводжуються викидами вуглекислого газу та інших небезпечних сполук. Саме тому функціонування діючих торфових родовищ потребує постійного екологічного моніторингу.

Оскільки торфовища часто є важкодоступними заболоченими територіями, польові дослідження стають трудомісткими та дорогавартісними. Сучасною та найефективнішою альтернативою є застосування методів дистанційного зондування Землі (ДЗЗ), які дозволяють здійснювати кросмасштабний, оперативний та безперервний моніторинг динаміки рослинного покриву [4]. Виняткову ефективність демонструє використання даних відкритого доступу багатоспектральних знімків супутникової місії Sentinel-2 завдяки їхній високій просторовій розрізненості (10 м) та частоті зйомки, що ідеально підходить для фіксації динамічних змін. Розрахунок спектральних вегетаційних індексів, серед яких найпоширенішим є NDVI (нормалізований різницевий вегетаційний індекс), є ключовим інструментом для оцінки складу, стану та об'єму зеленої біомаси, ідентифікації меж відкритих розробок, а також фіксації етапів вторинних сукцесій під час рекультивації або природного відновлення [5; 6].

Об'єктом дослідження є родовище торфу "Коза-Березина" (рис. 1), розташоване у межах Камінь-Каширського району Волинської області. На цій території з 2022 року функціонує діюче родовище, де ведеться активне добування торфової крихти для виробництва торфобрикету. Відповідно до екологічних умов провадження планованої діяльності, визначених у Висновку з оцінки впливу на довкілля № 21/01-20208276495/1 від 2 грудня 2021 року, погоджено видобування торфу на ділянках в урочищах Садок та Долина. Станом на теперішній час видобування торфу здійснюється в урочищі Долина. Згідно з рішеннями екологічної експертизи, у межах урочищ Робіття та Кілієв видобувна діяльність здійснюватися не буде.

Метою цього дослідження є здійснення комплексного ретроспективного та сучасного аналізу просторово-часової динаміки рослинного покриву родовища "Коза-Березина" за період з 2017 по 2025 роки [7]. Застосування масиву багатоспектральних даних Sentinel-2 та

розрахунок індексу NDVI у середовищі Google Earth Engine (GEE) дозволить об'єктивно оцінити просторові масштаби деградації екосистеми внаслідок видобутку торфу, а також дослідити тенденції природного відновлення флори (сукцесійних процесів) на прилеглих територіях.

**Аналіз літературних джерел та постановка проблеми.** Сучасні дослідження екосистем торфовищ все частіше спираються на методи дистанційного зондування Землі (ДЗЗ). Це зумовлено тим, що торфовища часто є важкодоступними територіями, що робить традиційні польові дослідження трудомісткими та дорогавартісними. Аналіз наукометричних баз за останні два десятиліття [1] свідчить про стрімке зростання кількості публікацій, присвячених використанню супутникових даних для моніторингу водно-болотних угідь. Цей стрибок насамперед пов'язаний із запуском європейської програми Copernicus [8] та доступністю даних супутників Sentinel-1 та Sentinel-2, які забезпечують безперервне спостереження з високою просторовою (до 10 м) та часовою (до 5 діб) розрізненістю [9].

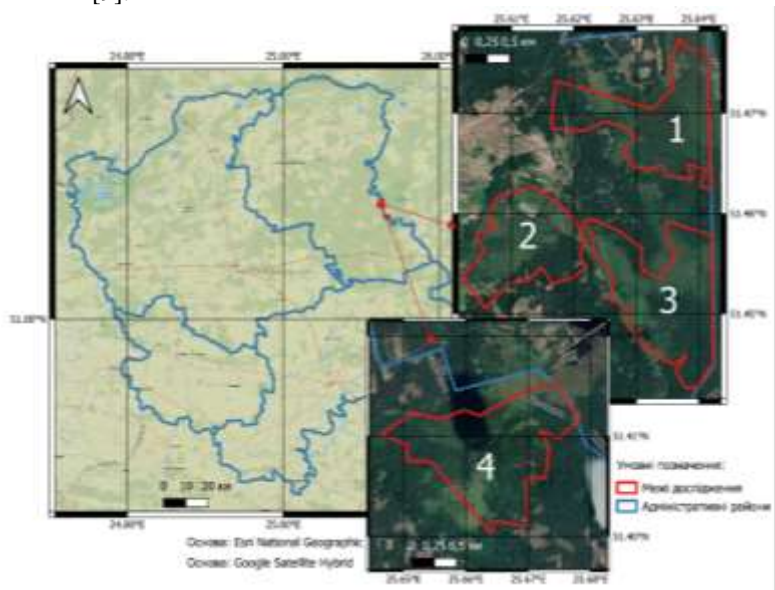


Рис. 1. Розташування промислового родовища торфу Коза-Березина (урочища: 1 – Робіття, 2 – Садок, 3 – Долина, 4 - Кілієв)

У світовій практиці дослідження торфовищ засобами ДЗЗ умовно поділяються на три основні напрями: картографування рослинності та біорізноманіття, оцінка глибини ґрунтових вод, а також моніторинг

потоків парникових газів. Для ідентифікації складу, стану та об'єму зеленої біомаси найширше застосовуються вегетаційні індекси. Найбільш популярним і часто використовуваним є нормалізований різницевий вегетаційний індекс (NDVI) [5], який корелює з проективним покриттям рослинності та запасами надземної фотосинтетично-активної фітомаси. Поряд із ним для оцінки зволоженості територій та виявлення водного стресу у рослин застосовують водні індекси, такі як NDWI [6]. Останні дослідження також акцентують увагу на високій ефективності індексів "червоного краю" (наприклад, NDRE, REP) [2; 3], які є чутливими до вмісту хлорофілу і дозволяють надійно ідентифікувати межі залягання торфу навіть під шаром рослинності.

Окремим важливим вектором літератури є моніторинг деградованих та порушених торфовищ. Осушення (меліорація) та промисловий видобуток призводять до різкого зниження рівня ґрунтових вод і формування пухкого шару торфової крихти, що екстремально змінює гідрологічний та температурний режими. У таких умовах первинна рослинність деградує, і розпочинаються процеси вторинної сукцесії, які характеризуються формуванням нестабільних маловидових синантропних угруповань. Крім того, порушені торфовища є зонами підвищеної пожежної небезпеки. Супутникові дані дозволяють ефективно фіксувати площі вигорань, оцінювати ризики самозагоряння на відкритих торфовищах та моніторити процеси відновлення рослинного покриву після припинення антропогенного чи пірогенного впливу.

### **Постановка проблеми**

Попри значну кількість теоретичних та практичних розробок у сфері ДЗЗ, локальний моніторинг діючих промислових торфовищ Українського Полісся залишається недостатньо висвітленим. Більшість українських торфовищ зазнали інтенсивного впливу ще під час масової меліорації у минулому столітті, проте сучасний промисловий видобуток формує нові, ще більш екстремальні осередки деградації.

Родовище "Коза-Березина", розташоване у Волинській області, є показовим об'єктом. Із 2022 року ця територія функціонує як діючий торфокар'єр для інтенсивного добування торфової крихти [10]. Хоча для цього об'єкта проводилися наземні дослідження флори та фауни (зокрема, еколого-географічна оцінка перед початком розробки у 2021 році), комплексного дистанційного аналізу динаміки рослинного покриву, що охоплював би періоди до початку активного видобутку та під час нього, бракує.

Отже, проблема полягає у необхідності об'єктивізації та просторової кількісної оцінки масштабів антропогенної трансформації

родовища "Коза-Березина". Для вирішення цього завдання необхідно використати часові ряди мультиспектральних супутникових знімків Sentinel-2 (через платформу GEE) за 2017–2025 роки. Розрахунок та аналіз індексу NDVI дозволить не лише точно локалізувати поточні межі відкритого видобутку торфу, але й оцінити стан зеленої біомаси на прилеглих територіях, відслідкувати темпи та напрямки сукцесійних процесів (природного відновлення), а також спрогнозувати подальший розвиток екосистеми в умовах тривалого промислового навантаження.

**Мета і завдання дослідження.** Метою дослідження є комплексне оцінювання просторово-часової динаміки стану рослинного покриву та екологічної трансформації родовища торфу "Коза-Березина" під впливом видобутку торфу з використанням мультиспектральних даних дистанційного зондування Землі (супутникової місії Sentinel-2) та вегетаційного індексу NDVI за період 2017–2025 років.

Дане дослідження потребує виконання наступних завдань:

1. Здійснити ретроспективний та поточний аналіз багатоспектральних знімків Sentinel-2 за вегетаційні періоди 2017–2025 років, застосовуючи інструменти хмарної платформи Google Earth Engine (GEE) та ГІС-середовища QGIS.
2. Розрахувати значення нормалізованого диференційного вегетаційного індексу (NDVI) для кількісної та якісної діагностики стану фітомаси на всій території родовища та здійснити класифікацію територій за ступенем розвитку рослинності.
3. Закартографувати межі територій з повністю деградованим рослинним покривом, де безпосередньо здійснюється видобуток торфосировини (урочище Долина), та проаналізувати зміну їхньої площі з моменту початку розробки кар'єру у 2022 році.
4. Оцінити стан збереженості рослинного покриву та відслідкувати темпи природного відновлення на ділянках, що не зазнають прямого впливу видобутку, зокрема в урочищах Робіття, Кілієв та Садок.
5. Підтвердити ефективність інтеграції мультиспектральних супутникових даних для оперативного та довгострокового екологічного моніторингу діючих промислових торфовищ та оцінки їхнього біорізноманіття.

## Матеріали та методи

Для виконання поставлених завдань щодо оцінки стану рослинного покриву та просторової динаміки торфового родовища "Коза-Березина" було застосовано комплекс методів дистанційного зондування Землі (ДЗЗ).

Основним джерелом просторових даних стали багатоспектральні супутникові знімки європейської місії Sentinel-2 (апарати Sentinel-2A та Sentinel-2B) [11], що реалізується в рамках програми спостереження за Землею Copernicus. Вибір цієї платформи зумовлений високою періодичністю зйомки (інтервал становить до 5 діб) та високою просторовою розрізненістю багатоспектрального сенсора MSI (до 10 метрів для видимого і ближнього інфрачервоного діапазонів), що робить ці дані оптимальними для детального моніторингу динамічних змін екосистем.

Пошук, доступ та первинний відбір супутникових знімків здійснювалися за допомогою хмарної платформи геопросторового аналізу Google Earth Engine (GEE). Для забезпечення високої точності аналізу використовувався набір даних гармонізованих значень поверхневого відбиття (COPERNICUS/S2\_SR\_HARMONIZED) за вегетаційні періоди 2017–2025 років. Для виявлення просторово-часових трендів змін стану рослинності відбиралися зображення з відсотком покриття хмарами не більше 5–10%.

Ключовим інструментом для оцінки якості, густоти та стану рослинності на торфовищі є нормалізований різницевий вегетаційний індекс (NDVI — Normalized Difference Vegetation Index) (1) [12–14]. Розрахунок цього індексу базується на вимірюванні відбивальної здатності рослинного покриву у двох ділянках електромагнітного спектра згідно з формулою:

$$NDVI = (NIR - RED) / (NIR + RED), \quad (1)$$

де *NIR* — значення відбиття у ближньому інфрачервоному спектрі, а *RED* — інтенсивність відбиття у червоному діапазоні спектра.

Принцип дії NDVI ґрунтується на двох найбільш стабільних фізико-хімічних характеристиках рослинності. У червоній зоні спектру (0,62–0,75 мкм) зелені рослини поглинають максимум сонячної радіації, оскільки вона використовується хлорофілом у процесі фотосинтезу. Водночас клітинна структура листя відображає максимальну кількість енергії у ближній інфрачервоній зоні (0,75–1,3 мкм). Відтак, висока фотосинтетична активність, притаманна здоровій та густій рослинності, призводить до малого відбиття світла в червоній зоні і потужного відбиття в інфрачервоній. Таке співвідношення дозволяє чітко розпізнавати зелену фітомасу та відокремлювати її від інших поверхонь (відкритого ґрунту, торфу, води тощо).

Значення індексу NDVI варіюють у межах від -1 до +1. Для точної ідентифікації зон впливу промислового видобутку та фіксації процесів відновлення фітомаси в урочищах родовища "Коза-Березина" нами застосована така класифікаційна шкала значень, що адаптована до специфічних умов видобутку торфу:

0,0 – 0,2 — відсутність біомаси (характерно для зон з відкритим торфом або голим ґрунтом).

0,2 – 0,3 — низький ступінь розвитку біомаси (початкові стадії розвитку рослинності або слабкий покрив).

0,3 – 0,6 — середній ступінь розвитку біомаси (чагарники, рідколісся, ділянки в процесі сукцесії).

0,6 – 1,0 — високий ступінь розвитку біомаси (густа, здорова та зімкнена лісова або водно-болотна рослинність).

### Результати та обговорення

Комплексний аналіз мультиспектральних супутникових знімків Sentinel-2 (у середовищі GEE) за 2017–2025 роки дозволив відслідкувати просторово-часову динаміку рослинного покриву родовища "Коза-Березина" та об'єктивно оцінити масштаби його екологічної трансформації в умовах антропогенного навантаження (рис. 2).

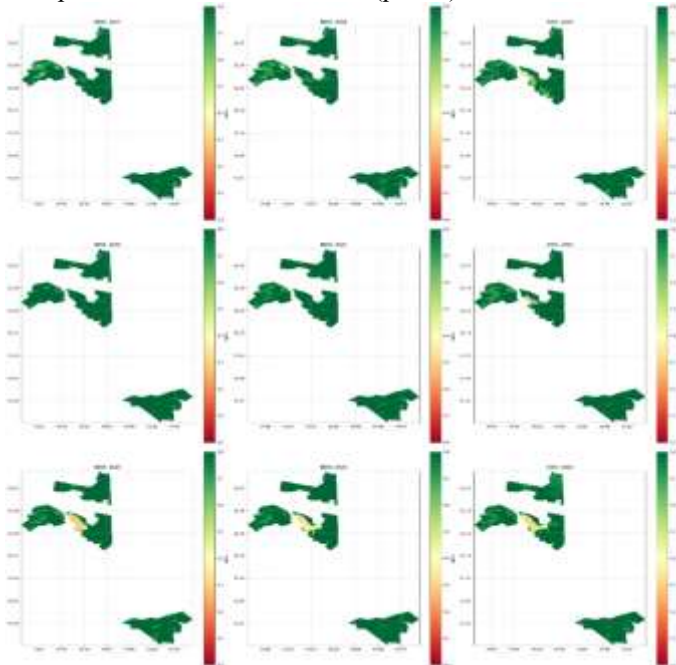


Рис. 2. Динаміка рослинного покриття за індексом NDVI за 2017–2025 роки.

Аналіз графіка часових рядів значень NDVI для всієї території родовища (рис. 3) демонструє чітко виражену синусоїдальну циклічність, що відповідає природним сезонним (фенологічним) змінам рослинності.

Мінімальні значення індексу фіксуються у зимово-весняний період, опускаючись до показників 0,1–0,2, тоді як пікові значення, що свідчать про максимальне накопичення зеленої біомаси, припадають на літні місяці (червень-липень) і досягають рівня 0,8–0,9.

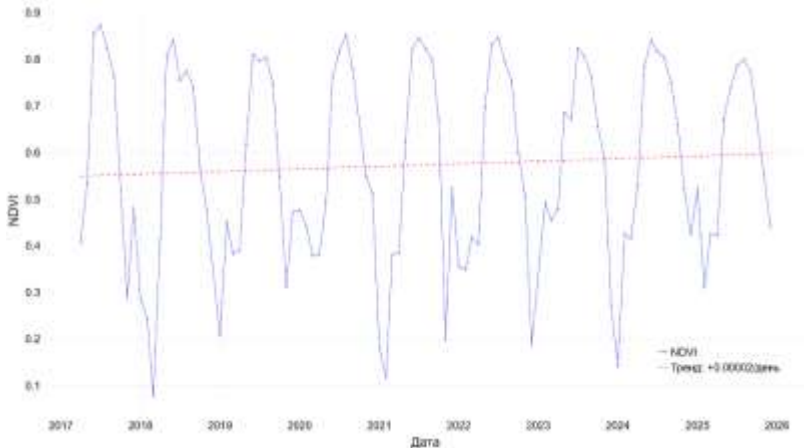


Рис. 3. Графік часових рядів значень NDVI

Незважаючи на те, що на території родовища (зокрема в урочищі Долина) з 2022 року ведеться активний промисловий видобуток торфу, загальний багаторічний лінійний тренд значень NDVI залишається стабільним із мінімальним позитивним нахилом (+0,00002/день). Це свідчить про те, що загальна площа непорушених або відновлюваних біотопів (зокрема в ур. Робіття, Кілієв, Садок) компенсує втрату біомаси на ділянці безпосереднього кар'єру.

Детальний аналіз діаграм розподілу площ за класами вегетаційного індексу з кроком значень 0,1 виявляє неоднорідність реакції екосистеми в різні роки (рис. 4, табл. 1).

Протягом усього досліджуваного періоду домінуючими залишаються класи з високими значеннями NDVI (0,7–1,0), що відповідають ділянкам із густою деревно-чагарниковою та водно-болотною рослинністю.

Водночас фіксуються значні міжрічні флуктації, обумовлені сукупною дією антропогенних і гідрометеорологічних чинників:

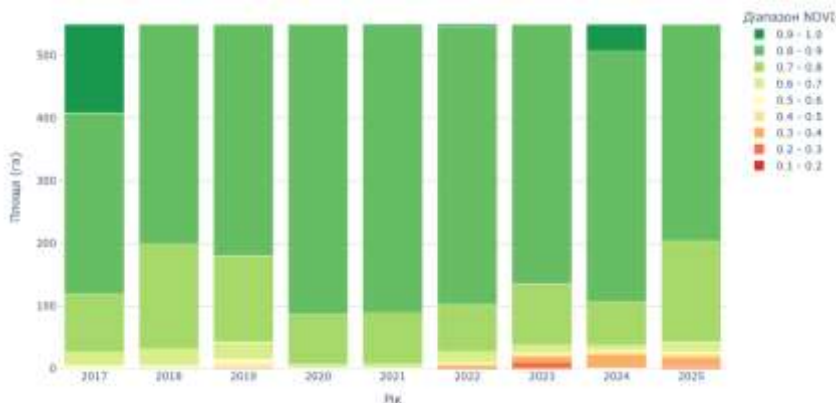


Рис. 4. Розподіл площ за класами NDVI

Таблиця 1. Розподіл площ за значенням NDVI, га

Рік	0.0–0.2 (Відсутність)	0.2–0.3 (Низький)	0.3–0.6 (Середній)	0.6–1.0 (Високий)
2017	—	—	26.73	523.58
2018	0.02	0.38	30.86	519.06
2019	0.12	2.46	40.80	506.94
2020	—	—	6.46	543.85
2021	—	—	8.37	541.94
2022	2.01	2.71	22.41	523.18
2023	9.95	10.53	17.65	512.17
2024	0.72	22.43	15.14	512.02
2025	4.13	14.08	25.14	506.96

- У 2019 році в урочищі Долина зафіксовано погіршення стану рослинного покриву, що проявлялося у формуванні ділянок із низькими значеннями NDVI (0,2–0,6), пов’язаними з пірогенним ураженням території. Упродовж наступних років, до 2022 року включно, на торфовищах, уражених пожежею, відбувалося відновлення піонерної рослинності, що супроводжувалося зростанням значень NDVI до рівня 0,7–0,9.
- У 2024 році встановлено негативну динаміку стану рослинного покриву відносно попередніх періодів. За результатами аналізу NDVI значні території характеризуються значеннями індексу в

межах 0,3–0,5, а в зоні активного відкритого видобутку торфу (урочище Долина) — нижче 0,1. Виявлені тенденції обумовлені інтенсифікацією видобутку, дефіцитом атмосферних опадів та зниженням рівнів ґрунтових вод унаслідок розвитку міжкартової дренажної мережі.

- У 2025 році ситуація стабілізувалася. Площа безпосереднього видобування відкритого торфу (із показниками NDVI 0,0–0,6) припинила своє розширення. Водночас, в урочищах Робіття та Кілієв спостерігалось покращення стану фітомаси: завдяки кращій забезпеченості атмосферними опадами та сприятливому температурному режиму, значно зросла площа територій із високими показниками індексу (0,6–0,9). Стан рослинності поза кар'єром у 2025 році оцінюється як добрий.

Для просторової локалізації екологічної трансформації було побудовано карту різниці значень NDVI між кінцевим (2025) та початковим (2017) роками дослідження (рис. 5). Карта наочно демонструє два протилежні процеси:

1. У центральній частині масиву (урочище Долина) сформувалася велика суцільна ділянка різкого погіршення показників NDVI (відмічена темно-червоним кольором). Ця аномалія ідеально збігається з контурами діючого торфокар'єру.
2. На периферії родовища, а також поблизу меліоративних каналів, фіксуються ділянки з позитивною динамікою індексу (зелені кольори на карті). Це є прямим індикатором розростання деревно-чагарникової рослинності.

Дистанційно зафіксована просторова картина повністю корелює з результатами наземних екологічних обстежень біорізноманіття [7]. Різке падіння NDVI в урочищі Долина зумовлене не лише поточним зняттям рослинного шару для видобутку торфової крихти, але й наслідками масштабних підземних пожеж, які вирували тут кілька років до початку активної розробки (2018-2019 рр.) і повністю знищили кореневі системи дерев.

Промислова діяльність сформувала на родовищі екстремальний едафо-гідрологічний режим, зокрема відбулося різке пониження рівня ґрунтових вод, утворився пухкий шар торфу, нездатний утримувати вологу, підвищилася аерація кореневого шару. У таких умовах на відкритих ділянках кар'єру фіксується уповільнений розвиток сукцесій та формування виключно маловидових синантропних (бур'янових) угруповань з домінуванням терофітів, які утворюють нестабільні монодомінантні парцели. Відповідно, такі ділянки на супутникових

знімках класифікуються як зони з низьким рівнем розвитку біомаси ( $NDVI < 0,6$ ).

Разом з тим, позитивний багаторічний тренд NDVI пояснюється активними процесами вторинної сукцесії на ділянках, що не зазнають прямого руйнівного впливу, зокрема вздовж численних меліоративних каналів. Завдяки кращій зволоженості там формується стійка багаторярусна рослинність, що складається з різних видів верб, вільхи чорної, берези та осики. Ці зони виступають своєрідними екологічними коридорами та джерелами насіння для поступового природного відновлення порушених земель родовища.

Для більш глибокого розуміння еволюції рослинного покриву та відслідковування того, як саме трансформувалися конкретні ділянки з року в рік, було проаналізовано дані динаміки змін за допомогою Санкей-діаграми (рис. 6). Цей інструмент дозволяє візуалізувати "потoki" площ, що переходять з одного класу вегетаційного індексу в інший протягом 2017–2025 років.

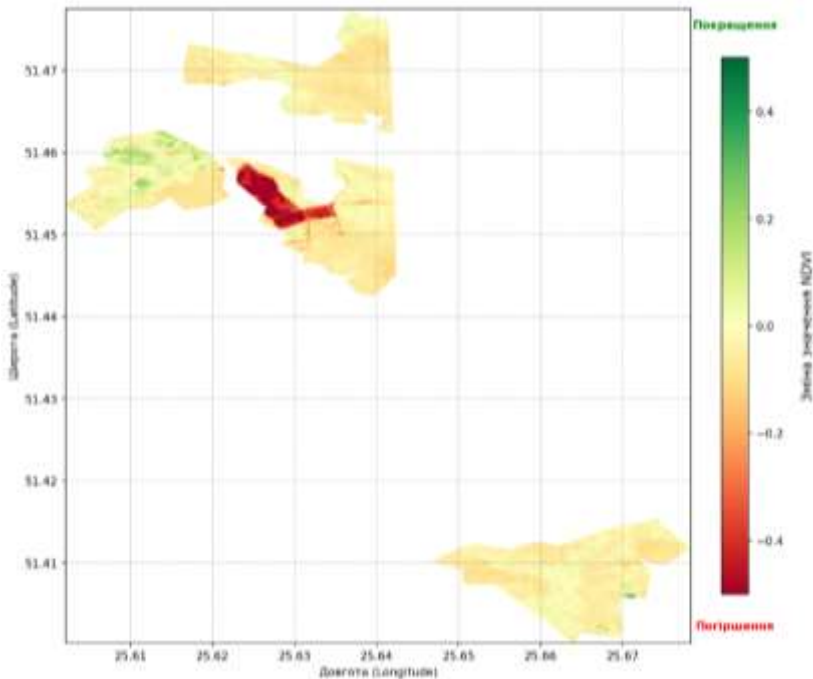


Рис. 5. Динаміка змін індексу NDVI за 2017-2025 роки

Аналіз потоків на діаграмі дозволяє виявити кілька ключових закономірностей:

По-перше, протягом усього 9-річного періоду найпотужніші потоки зосереджені у верхній частині діаграми і відображають збереження високих показників біомаси (класи 0,7–0,8, 0,8–0,9 та 0,9–1,0). Переходи між цими класами здебільшого мають горизонтальний характер або незначно коливаються під впливом сезонних метеорологічних умов. Це свідчить про високу екологічну стабільність периферійних ділянок родовища (урочища Робіття, Кілієв), де рослинність залишається густою та продуктивною.

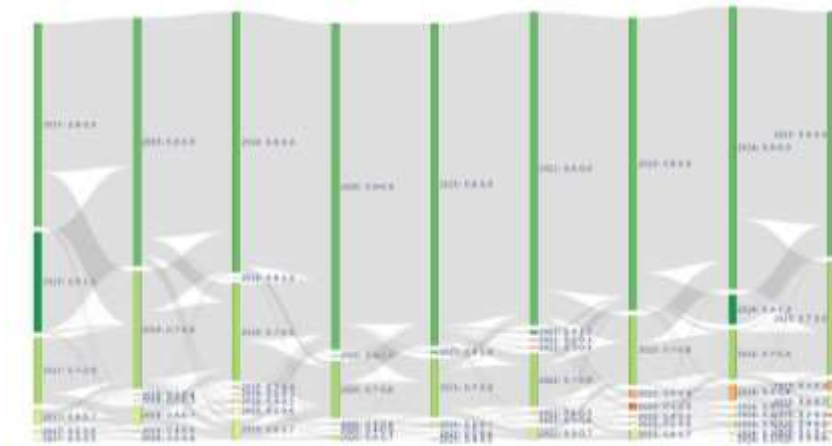


Рис. 6. Санкей-діаграма трансформації територій за класами індексу NDVI

По-друге, починаючи з 2022 року, на діаграмі чітко формуються нові, спадні потоки. Частина площ, які раніше належали до класів із задовільним розвитком біомаси, різко "перетікає" у нижні спектри діаграми — класи 0,3–0,4, 0,2–0,3 та критичний 0,1–0,2. Найбільш вираженим цей низхідний тренд стає у 2023 та 2024 роках, що ідеально корелює з періодом розширення площі відкритого видобутку торфу в урочищі Долина, де показники NDVI впали нижче 0,1.

По-третє, переходи між 2024 та 2025 роками на Санкей-діаграмі демонструють позитивні зміни. По-перше, припиняється розширення потоків до найнижчого класу (0,1–0,2), що підтверджує зупинку територіальної експансії діючого кар'єру. По-друге, спостерігається потужний висхідний потік: значна частка площ, що у 2024 році перебували у класі 0,7–0,8, у 2025 році масово перейшла до вищого класу 0,8–0,9. Цей

макроперехід пояснюється кращою забезпеченістю атмосферними опадами у 2025 році, що стимулювало активний ріст зеленої біомаси на збережених та відновлюваних ділянках родовища.

### **Висновки**

Застосування багатоспектральних супутникових даних місії Sentinel-2, розрахунок вегетаційного індексу NDVI та інструментів моделювання динаміки переходів (Санкей-діаграми) довело свою високу ефективність для кросмасштабного екологічного моніторингу промислових торфовищ. Інтеграція цих дистанційних методів дозволяє з високою точністю ідентифікувати межі антропогенного втручання, оцінювати ступінь деградації та кількісно відслідковувати напрямки еволюції рослинного покриву в умовах зміни гідрологічного режиму.

Промисловий видобуток торфу, що ведеться з 2022 року на території родовища "Коза-Березина" (зокрема, в урочищі Долина), призвів до формування жорстко локалізованого осередку деградації екосистеми. У зоні безпосередньої розробки природний рослинний покрив повністю знищено, що підтверджується падінням значень NDVI до критичних показників (нижче 0,1–0,2). Відкритий видобуток сформував екстремальні едафо-гідрологічні умови (пониження рівня ґрунтових вод, утворення сухої торфової крихти), що суттєво гальмують процеси відновлення та сприяють розвитку переважно маловидових синантропних угруповань.

Аналіз динаміки переходів площ між класами NDVI засвідчив макростабілізацію екологічної ситуації станом на 2025 рік. Територіальна експансія відкритого кар'єру припинилася, про що свідчить зупинка низхідних перетоків до найнижчих класів вегетаційного індексу. Водночас, завдяки сприятливим гідрометеорологічним умовам (краща забезпеченість атмосферними опадами), у 2025 році зафіксовано потужний висхідний тренд — масовий перехід площ із середніх класів розвитку біомаси до найвищих (NDVI 0,8–1,0).

Незважаючи на появу діючого кар'єру, загальний багаторічний тренд динаміки рослинного покриву родовища (2017–2025 рр.) залишається стабільним із мінімальним позитивним вектором. Це доводить високу екологічну пластичність та стійкість фонові екосистеми масиву. Локальні втрати біомаси ефективно компенсуються за рахунок збереження густої фітомаси в урочищах Робіття, Кілієв та Садок, а також завдяки активним процесам вторинної сукцесії. Формування стійких деревно-чагарникових біотопів по берегах меліоративних каналів створює екологічні коридори, що сприятимуть подальшій ренатуралізації порушених земель торфовища.

Майбутні дослідження вимагають переходу від класичних мультиспектральних індексів до більш спеціалізованих. Зокрема, перспективним є ширше застосування індексів, що базуються на короткохвильовому інфрачервоному діапазоні (SWIR), оскільки він є найбільш чутливим до вмісту вологи. До таких індексів належать MNDWI (модифікований водний індекс), WIW (Water in Wetlands — вода у водно-болотних угіддях), SMBWI (мультидіапазонний водний індекс Sentinel) та S2WI. Вони дозволяють з високою точністю (понад 96%) [4; 6] відокремлювати воду від змішаного рослинного покриву та відкритого ґрунту, а також фіксувати сезонну або ефемерну воду, приховану під густою рослинністю.

Радарні дані із синтезованою апертурою (SAR) С-діапазону, які надаються супутниками Sentinel-1, є незамінними завдяки здатності сигналу проникати крізь хмарність та частково крізь рослинний покрив, незалежно від погодних умов і часу доби. Перспективи застосування SAR включають оцінку глибини залягання ґрунтових вод та вологості ґрунту. Аналіз зворотного розсіювання мікрохвиль чутливо реагує на діелектричну проникність верхніх шарів ґрунту, що дозволяє дистанційно картографувати динаміку вологості.

Моніторинг рухів поверхні ("дихання болота") за допомогою методів радарної інтерферометрії (InSAR), дозволяє відстежувати міліметрові вертикальні зміщення поверхні торфовища. Це є критично важливим індикатором стабільності екосистеми, гідрологічних змін та швидкості накопичення вуглецю.

Одним із найперспективніших напрямів майбутніх досліджень є комплексна інтеграція мультиспектральних оптичних зображень (Sentinel-2) із радарними даними (Sentinel-1). Цей підхід може вирішити ключову проблему спотворення радарного сигналу під впливом структури рослинності (її густоти та фенології). Використання оптичних індексів (NDVI, NDWI тощо) для визначення характеристик рослинного покриву дозволяє коригувати радарний сигнал, завдяки чому можна значно точніше моделювати вміст вологи в ґрунті. Така синергія може забезпечити отримання додаткової інформації про поверхневу вологість, площі затоплень та структуру фітомаси, що дозволить вивести якість класифікації та прогнозування змін у водно-болотних екосистемах на принципово новий рівень.

### **Конфлікти інтересів**

Автори заявляють, що у них немає конфлікту інтересів щодо поточного дослідження, включаючи фінансовий, особистий, авторський чи будь-який інший, який міг би вплинути на дослідження, а також на результати, наведені в цьому документі.

### Фінансування

Дослідження проводилося протягом 2021-2025 років на замовлення Комунального підприємства «Волиньприродресурс» Волинської обласної ради в рамках виконання науково-дослідної роботи "Польові дослідження флори, фауни та біорізноманіття, оселищ, міграція на території планованої діяльності "Видобування торфу на родовищі "Коза-Березина"" та науково-дослідної роботи за темою "Обстеження території в межах спецдозволів з розробки запасів категорії С2 бурштиноносних ділянок – Маневицька-1, Маневицька-2, Камінь-Каширська-1, Камінь-Каширська-2; та території родовищ торфу – Велике Багно, Велике Болото, Коза-Березина, Стобихівське".

### Доступність даних

Усі дані представлені в основному тексті статті у цифровій і графічній формах.

### Використання штучного інтелекту

Автори підтверджують, що при створенні поточної роботи вони не використовували технології штучного інтелекту.

### References

1. Rasiun, V., Voloshin, V., Rudyk, O., et al. A Study on the Use of Remote Sensing Methods for Monitoring and Mapping Peatlands. *Modern Achievements in Geodetic Science and Production: Collection of Scientific Papers*. Lviv: Lviv Polytechnic Publishing House, 2025. No. 1(49). pp. 201–211.
2. Lyalko V.I., Dugin S.S., Sybirtseva O.M., et al. On the possibility of identifying peatland features using remote sensing data. *Geological Journal*. 2023. № 4. С. 61—78. DOI: 10.30836/igs.1025-6814.2023.4.288929.
3. Lischenko L., Shevchuk R., Filipovich V. The technique for satellite monitoring of peatlands in order to determinate their fire hazard and combustion risks. *Ukrainian journal of remote sensing*. 2022. Т. 9, № 1. С. 16—25. DOI: 10.36023/ujrs.2022.9.1.210.
4. Czapiewski S., Szumińska D. An Overview of Remote Sensing Data Applications in Peatland Research Based on Works from the Period 2010–2021. *Land*. 2021. Т. 11, № 1. С. 24. DOI: 10.3390/land11010024.
5. Melnyk O., Brunn A. Analysis of Spectral Index Interrelationships for Vegetation Condition Assessment on the Example of Wetlands in Volyn Polissya, Ukraine. *Earth (Switzerland)*. Multidisciplinary Digital Publishing Institute (MDPI), 2025. Т. 6, № 2. DOI: 10.3390/earth6020028.
6. Melnyk O., Brunn A. Seasonal and Long-Term Water Regime Trends of Cheremsky Wetland: Analysis Based on Sentinel-2 Spectral Indices and Composite Indicator Development. *Remote Sensing*. Multidisciplinary Digital Publishing Institute (MDPI), 2025. Т. 17, № 14. DOI: 10.3390/rs17142363.
7. Radzii V.F., Kotsun L.O., Melnyk O.V., Sukhomlin K.B. Field studies of flora, fauna, and biodiversity, habitats, and migration in the area of the planned "Peat extraction at the Kozha-Berezina deposit" project. Lutsk: Lesya Ukrainka Volyn National University, 2021. 111 pp.

8. European Space Agency. Sentinel Online - ESA [Електронний ресурс]. European Space Agency - Earth Online. 2020.
9. Reynolds N., Mota B., Nightingale J.M. Open-access satellite data for peatland condition and restoration monitoring in the UK: a review. *Frontiers in Environmental Science*. 2025. T. Volume 13-2025. DOI: 10.3389/fenvs.2025.1685165.
10. Boiaryn M., Nekos A., Radzii V., et al. Impact of peat extraction from the peatlands of upper Pripyat basin on the environment. *Visnyk of V. N. Karazin Kharkiv National University. Series Geology. Geography. Ecology*. 2025. № 62. С. 401—411. DOI: 10.26565/2410-7360-2025-62-30.
11. Gatti A., Naud C., Castellani C., Carriero F. Sentinel-2 Products Specification Document. *Thales Alenia Space*. 2018.
12. Gandhi G.M., Parthiban S., Thummalu N., Christy A. NDVI: Vegetation Change Detection Using Remote Sensing and Gis – A Case Study of Vellore District. *Procedia Computer Science*. 2015. T. 57. С. 1199—1210. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.procs.2015.07.415>.
13. Valor E., Environment V.C.-R. sensing of, 1996 undefined. Mapping land surface emissivity from NDVI: Application to European, African, and South American areas. *Elsevier*. 1995. T. 57. С. 167—184.
14. Zheng Y., Han J., Huang Y., et al. Vegetation response to climate conditions based on NDVI simulations using stepwise cluster analysis for the Three-River Headwaters region of China. *Ecological Indicators*. 2018. T. 92. С. 18—29. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ecolind.2017.06.040>.

### Література

1. Расюн, В., Волошин В., Рудик, О., та ін. Дослідження використання методів ДЗЗ для моніторингу та картографування торфовищ. *Сучасні досягнення геодезичної науки та виробництва: збірник наукових праць*. Львів: Видавництво Львівської політехніки, 2025. № 1(49). С. 201—211.
2. Lyalko V.I., Dugin S.S., Sybirtseva O.M., та ін. On the possibility of identifying peatland features using remote sensing data. *Geological Journal*. 2023. № 4. С. 61—78. DOI: 10.30836/igs.1025-6814.2023.4.288929.
3. Lischenko L., Shevchuk R., Filipovich V. The technique for satellite monitoring of peatlands in order to determinate their fire hazard and combustion risks. *Ukrainian journal of remote sensing*. 2022. T. 9, № 1. С. 16—25. DOI: 10.36023/ujrs.2022.9.1.210.
4. Czapiewski S., Szumińska D. An Overview of Remote Sensing Data Applications in Peatland Research Based on Works from the Period 2010–2021. *Land*. 2021. T. 11, № 1. С. 24. DOI: 10.3390/land11010024.
5. Melnyk O., Brunn A. Analysis of Spectral Index Interrelationships for Vegetation Condition Assessment on the Example of Wetlands in Volyn Polissya, Ukraine. *Earth (Switzerland)*. Multidisciplinary Digital Publishing Institute (MDPI), 2025. T. 6, № 2. DOI: 10.3390/earth6020028.
6. Melnyk O., Brunn A. Seasonal and Long-Term Water Regime Trends of Cheremsky Wetland: Analysis Based on Sentinel-2 Spectral Indices and Composite Indicator Development. *Remote Sensing*. Multidisciplinary Digital Publishing Institute (MDPI), 2025. T. 17, № 14. DOI: 10.3390/rs17142363.
7. Радзій В.Ф., Коцун Л.О., Мельник О.В., Сухомлін К.Б. Польові дослідження флори, фауни та біорізноманіття, оселищ, міграція на території

планованої діяльності «Видобування торфу на родовищі «Коза-Березина». Луцьк: Волинський національний університет імені Лесі Українки, 2021. 111 с.

8. European Space Agency. Sentinel Online - ESA [Електронний ресурс]. European Space Agency - Earth Online. 2020.

9. Reynolds N., Mota B., Nightingale J.M. Open-access satellite data for peatland condition and restoration monitoring in the UK: a review. *Frontiers in Environmental Science*. 2025. Т. Volume 13-2025. DOI: 10.3389/fenvs.2025.1685165.

10. Boiaryn M., Nekos A., Radzii V., та ін. Impact of peat extraction from the peatlands of upper Pripyat basin on the environment. *Visnyk of V. N. Karazin Kharkiv National University. Series Geology. Geography. Ecology*. 2025. № 62. С. 401—411. DOI: 10.26565/2410-7360-2025-62-30.

11. Gatti A., Naud C., Castellani C., Carriero F. Sentinel-2 Products Specification Document. *Thales Alenia Space*. 2018.

12. Gandhi G.M., Parthiban S., Thummalu N., Christy A. Ndvi: Vegetation Change Detection Using Remote Sensing and Gis – A Case Study of Vellore District. *Procedia Computer Science*. 2015. Т. 57. С. 1199—1210. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.procs.2015.07.415>.

13. Valor E., Environment V.C.-R. sensing of, 1996 undefined. Mapping land surface emissivity from NDVI: Application to European, African, and South American areas. *Elsevier*. 1995. Т. 57. С. 167—184.

14. Zheng Y., Han J., Huang Y., та ін. Vegetation response to climate conditions based on NDVI simulations using stepwise cluster analysis for the Three-River Headwaters region of China. *Ecological Indicators*. 2018. Т. 92. С. 18—29. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ecolind.2017.06.040>.

Відомості про статтю:	Article information:
Отримано 12.05.2026	Received 12.05.2026
Отримано у доопрацьованому вигляді 15.05.2026	Received in revised form 15.05.2026
Прийнято 27.05.2026	Accepted 27.05.2026
Опубліковано 29.05.2026	Published 29.05.2026

## V. L. Rasiun

Senior Lecturer, ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-2053-7561>

Department of Geodesy, Land Management, and Cadastre

Lesya Ukrainka Volyn National University, 13 Volia Ave., Lutsk, Ukraine, 43025

## O. V. Melnyk

Ph.D. in Engineering, Associate Professor, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-5429-4038>

Department of Geodesy, Land Management, and Cadastre

Lesya Ukrainka Volyn National University, 13 Volia Ave., Lutsk, Ukraine, 43025

## V.F. Radzii

Ph.D. in Geography, Associate Professor, ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-8757-4944>

Department of Geodesy, Land Management, and Cadastre

Lesya Ukrainka Volyn National University, 13 Volia Ave., Lutsk, Ukraine, 43025

\*corresponding author, e-mail: [hockins@vnu.edu.ua](mailto:hockins@vnu.edu.ua)

## Integration of Sentinel-2 data and the Google Earth Engine platform for spatiotemporal monitoring of peat extraction locations

How to Cite:

Rasiun V.L., Melnyk O.V., Radzii V.F. (2026). Integration of Sentinel-2 data and the Google Earth Engine platform for spatiotemporal monitoring of peat extraction locations. *Modern technologies and calculation methods in construction.*, 25, 178-196. [https://doi.org/10.36910/6775-2410-6208-2026-15\(25\)-14](https://doi.org/10.36910/6775-2410-6208-2026-15(25)-14)

*Abstract. This study presents a comprehensive spatiotemporal analysis of the ecological transformation and dynamics of the vegetation cover at the “Koz-Berezina” peat deposit (Volyn Oblast, Ukraine) under the influence of anthropogenic pressure. Given the intensive industrial exploitation of peatlands in the Ukrainian Polissya, which is inevitably accompanied by a radical change in the hydrological regime, degradation of natural habitats, the formation of a loose layer of peat crumbs, and an increased fire hazard, the need for continuous cross-scale monitoring of such areas has become extremely urgent. The aim of this study is to quantitatively and spatially assess the extent of ecosystem devastation resulting from open-pit peat extraction, as well as to identify processes of natural flora recovery (secondary succession) over a 9-year period (2017–2025).*

*Multispectral images with high spatial and temporal resolution from the Sentinel-2 satellite mission were used as the primary source of geospatial data. Data processing was performed in the Google Earth Engine (GEE) cloud environment and GIS QGIS. The normalized difference vegetation index (NDVI) served as the primary biophysical indicator of the state and volume of phytomass. For in-depth spatial modeling of ecosystem development vectors and visualization of area transitions between different NDVI classes from year to year, flow analysis using a Sankey diagram was applied.*

*The results of long-term monitoring indicate a heterogeneous response of the wetland ecosystem to anthropogenic intervention. A distinct spatial localization of the focal point of ecological devastation was recorded directly within the quarry zone (Dolyna tract), where NDVI values dropped critically (below 0.1–0.2) as a result of vegetation removal. An analysis of transition dynamics confirms that the highest level of degradation and spatial expansion of areas with exposed peat will occur in 2023–2024.*

*At the same time, the study revealed high ecological plasticity and strong regenerative potential of the deposit’s background ecosystem. It was established that the overall linear trend of NDVI values for the entire study period remains stable with a positive slope. As of 2025, the territorial expansion of peat extraction has ceased. Analysis of the Sankey diagram clearly visualizes macro-stabilization and an upward trend at the end of the period: significant areas of vegetation have massively shifted to higher NDVI classes (0.8–1.0).*

*It has been established that the integration of open Sentinel-2 multispectral optical data, the capabilities of the GEE platform, and methods for visualizing transition dynamics is an objective, reliable, and highly effective approach for environmental monitoring of active peatlands, enabling the optimization of strategies for sustainable natural resource use and wetland management.*

*Keywords: remote sensing, industrial peatlands, NDVI, Sentinel-2 multispectral data, Google Earth Engine (GEE), vegetation dynamics.*