

ГЕОІНФОРМАЦІЙНІ ПІДХОДИ ЕКОЛОГІЧНОГО ОЦІНЮВАННЯ ВУГІЛЬНИХ ВІДВАЛІВ

GEOINFORMATION APPROACHES TO ECOLOGICAL ASSESSMENT OF COAL DUMPS

Олег Мандрик, д. т. н., професор кафедри екології, e-mail: Mandryk68@gmail.com, Івано-Франківський національний технічний університет нафти і газу, ORCID: 0000-0002-2689-7165.

Катерина Барабан, аспірантка кафедри екології, e-mail: beemveshka@gmail.com, Івано-Франківський національний технічний університет нафти і газу, ORCID: 0009-0001-7429-4051.

<https://doi.org/10.32447/bcet.2025.21>

Анотація. У монографії висвітлено сучасні підходи до екологічного оцінювання техногенно трансформованих територій, зокрема вугільних відвалів, із використанням геоінформаційних технологій. Запропоновано методику картографічного моделювання просторового поширення забруднювальних чинників на територіях, порушених вугільною промисловістю.

Використання геоінформаційних систем дало змогу сформувати серію аналітичних карт, що відображають рівні забруднення, стан фітомеліоративного покриву та динаміку змін екологічного стану досліджуваних екосистем.

Проведено екологічне оцінювання із залученням результатів польових спостережень і лабораторних вимірів, що дозволило підвищити достовірність просторових моделей і забезпечити наукове обґрунтування заходів рекультивації. Результати дослідження можуть бути використані для підвищення ефективності систем моніторингу, планування відновлення деградованих ландшафтів і забезпечення екологічної безпеки в регіонах інтенсивної гірничої діяльності.

Ключові слова: екологічне оцінювання, вугільні відвали, геоінформаційні системи, картографічне моделювання, фітомеліоративна ефективність, рекультиваційні заходи, екологічна безпека, деградовані території вугільною діяльністю.

Abstract. The monograph presents modern approaches to the ecological assessment of technogenically transformed areas, particularly coal waste heaps, using geoinformation technologies. A methodology for cartographic modeling of the spatial distribution of pollutants in coal-mining-affected territories is proposed. The application of geographic information systems enabled the development of a series of analytical maps reflecting pollution levels, the state of phytomeliorative cover, and the dynamics of ecological changes in the studied ecosystems.

An analysis of environmental monitoring was conducted using the results of field observations and laboratory measurements, which allowed for increased accuracy of spatial models and provided a scientific basis for reclamation measures. The research results can be used to enhance the effectiveness of monitoring systems, support the planning of landscape restoration, and ensure environmental safety in regions impacted by intensive mining activity.

Keywords: ecological assessment, geographic information systems, coal waste heaps, cartographic modeling, phytomeliorative efficiency, degraded landscapes, reclamation, environmental safety.

ВСТУП

В умовах зростання техногенного навантаження на довкілля та посилення наслідків кліматичних змін особливої актуальності набуває вдосконалення підходів до екологічного оцінювання порушених територій. Одним із найбільш екологічно вразливих об'єктів є вугільні відвали, які суттєво впливають на стан ґрунтів, водних ресурсів і біорізноманіття, формуючи осередки локального та регіонального забруднення^{660,661}.

Систематичне накопичення гірничих порід без належного екологічного контролю призводить до ускладнення просторової структури забруднення, що ускладнює планування ефективних заходів реабілітації. У цьому контексті необхідним є застосування інтегрованих геоінформаційних підходів, здатних забезпечити об'єктивну оцінку стану довкілля, просторовий аналіз ризиків та обґрунтування природоохоронних рішень^{662,663}.

Актуальність дослідження зумовлена потребою у використанні геоінформаційних систем (ГІС) як інструменту картографічного моделювання для виявлення, аналізування й прогнозування екологічно небезпечних чинників на територіях, порушених вугледобувною діяльністю. Особливе значення має оцінювання фітомеліоративної ефективності покриву на породних відвалах, що дозволяє не лише оцінити поточний стан техногенного ландшафту, але й розробити науково обґрунтовані рекомендації для його відновлення.

Отримані результати мають прикладне значення для вдосконалення систем моніторингу, моделювання екологічних змін та підвищення рівня екологічної безпеки в зонах впливу вугільної промисловості.

МЕТОДОЛОГІЯ

У межах даного дослідження реалізовано комплексну методику екологічного оцінювання вугільних відвалів із використанням геоінформаційних технологій. Основу підходу становить інтеграція просторового аналізу, цифрового картографування та методів екологічного моделювання.

Для проведення просторового аналізу використовувалися мультиспектральні супутникові знімки Landsat-TM, що забезпечили деталізацію покриття територій та виявлення деградованих ділянок (рис. 1). Аналіз даних здійснювався в середовищах MapInfo та ArcGIS, а також із використанням графічного пакету Surfer для побудови поелементних еколого-техногенних карт із інтерполяцією даних.

⁶⁶⁰ Malets I., et. al., Interactive computer simulators in rescuer training and research of their optimal use indicator, *EEE Second International Conference on Data Stream Mining & Processing (DSMP)*, Lviv, Ukraine, 2018. pp. 558–562. <https://doi.org/10.1109/DSMP.2018.8478486>

⁶⁶¹ Popovych V., et. al., Monitoring of ground forest fire impact on heavy metals content in edafic horizons. *Journal of Ecological Engineering*, 22(5), 2021. pp. 96–103. <https://doi.org/10.12911/22998993/135872>

⁶⁶² Popovych V.V., et. al., Environmental impact of devastated landscapes of Volhynian Upland and Male Polisia (Ukraine). *Environmental Research, Engineering and Management*, 75(3), 2019. pp. 33–45. <https://doi.org/10.5755/j01.ere.m.75.3.23323>

⁶⁶³ Skrobala V., et. al., Ecological patterns for vegetation cover formation in the mining waste dumps of the Lviv-Volyn coal basin. *Mining of Mineral Deposits*, 14(2), 2020. 119–127. <https://doi.org/10.33271/mining14.02.119>

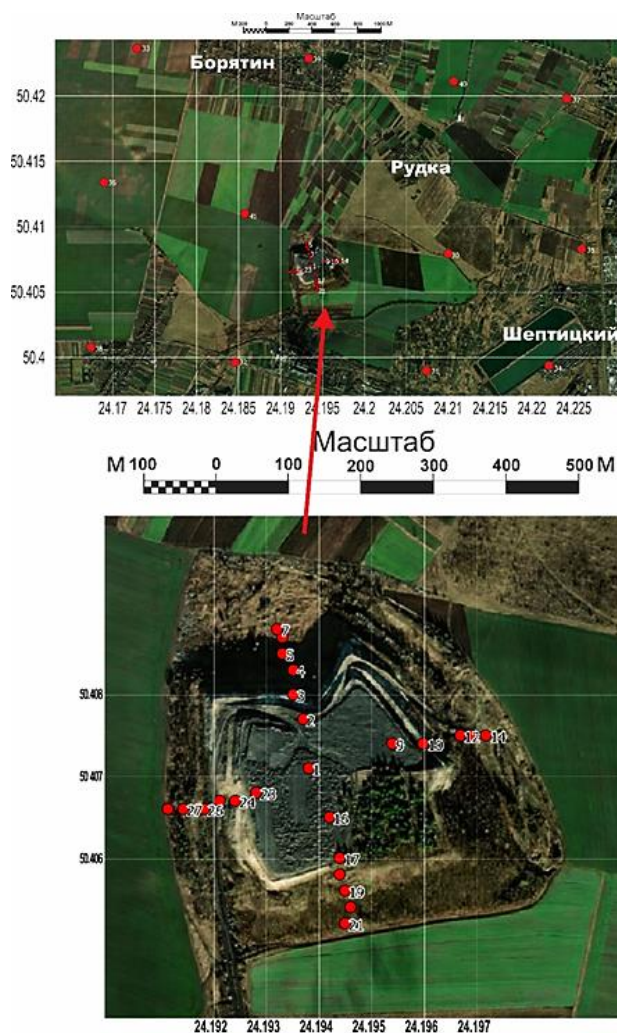


Рисунок 1. Карта фактичного матеріалу

Методика оцінювання базувалась на поетапному картографуванні компонентів ландшафту в межах буферних зон навколо териконів (радіусом до 500 м). Було сформовано серію тематичних карт.

Дані з тематичних карт інтегрувалися у єдину ГІС-модель, що забезпечило можливість проведення багатошарового аналізу.

Для визначення рівнів забруднення застосовувався метод електронного накладання поелементних карт з розрахунком сумарного техногенного пресингу. За допомогою функцій кореляції і класифікації у ГІС-середовищі ідентифіковано:

- зони аномального забруднення, де концентрації токсичних елементів перевищують фон у декілька разів;
- ділянки з перевищенням гранично допустимих концентрацій (ГДК) — як критичні зони впливу на біоту та людину;
- просторову кореляцію між осередками забруднення та техногенними джерелами (вугільні відвали, промислові об'єкти, транспортні коридори).

Для аналітичної візуалізації застосовувались функції ізолінійного моделювання у програмі Surfer, що дозволило побудувати карти концентрацій забруднювальних речовин із точним геопросторовим позиціонуванням.

Запропонована методика дозволила забезпечити високу просторову деталізацію екологічного оцінювання та заклала підґрунтя для розробки адаптивних фіторекультивацийних заходів.

Комплексне поєднання даних польових спостережень, лабораторних аналізів та геоінформаційного моделювання дозволило сформувати багаторівневу систему оцінювання екологічного стану техногенно трансформованих територій. Застосування ГІС-платформ забезпечило точне позиціонування зон забруднення, виявлення просторових аномалій, а також інтеграцію результатів у цифрові картографічні моделі. Такий підхід не лише підвищує об'єктивність екологічної діагностики, а й відкриває можливості для формування науково обґрунтованих заходів екологічної реабілітації на регіональному рівні^{664,665,666,667}.

РЕЗУЛЬТАТИ

Просторове моделювання забруднення ґрунтів

У зонах формування та експлуатації вугільних відвалів ґрунтове середовище зазнає значного техногенного навантаження, що супроводжується накопиченням потенційно токсичних елементів, зокрема важких металів. Висока міграційна здатність цих речовин, їх стійкість у навколишньому середовищі та здатність до участі в біохімічних процесах обумовлюють небезпеку для екосистем і здоров'я людини.

У цьому контексті важливим науковим завданням є проведення екотоксикологічного аналізу вмісту важких металів у ґрунтах та породах, розташованих у безпосередній близькості до техногенних об'єктів, із метою виявлення рівнів забруднення, просторової структуризації навантаження та формування обґрунтованих підходів до екологічної реабілітації порушених територій.

У межах дослідження проведено лабораторний аналіз вмісту важких металів у зразках ґрунту, відібраних із ділянок в межах досліджуваного терикону шахти. Дослідження мало на меті визначити рівень техногенного забруднення, виявити зони підвищеної концентрації потенційно токсичних елементів та оцінити екологічний ризик для довкілля як основу для подальших фіторекультивацийних заходів.

Дослідження проводилися на базі акредитованої лабораторії Дністровського БУВРУ відповідно до європейських стандартів, із використанням методик моніторингу стану ґрунтового покриву⁶⁶⁸.

Дослідження охоплювало визначення концентрацій найпоширеніших і найбільш токсикологічно значущих елементів — свинцю (Pb), кадмію (Cd), міді (Cu), цинку (Zn), марганцю (Mn) та заліза (Fe). Ці елементи характеризуються здатністю до біоаккумуляції, тривалим збереженням у ґрунтовому середовищі та істотним впливом на структурно-функціональні властивості ґрунтових екосистем.

Аналіз проб ґрунту, відібраних у межах буферної зони терикону, засвідчив присутність типових техногенних забруднювачів — важких металів, зокрема свинцю (Pb), кадмію (Cd), міді (Cu), цинку (Zn), марганцю (Mn) та заліза (Fe). Основними джерелами надходження цих елементів до ґрунтового середовища є атмосферне осідання пилу з поверхні терикону, вилуговування мінералів відвальних мас, а також дренажні потоки, збагачені розчинними формами металів.

З метою забезпечення методичної узгодженості, для всіх досліджуваних елементів, було застосовано єдину схему просторового аналізу та побудови відповідних картографічних моделей.

⁶⁶⁴ Зорін Д. О. Географічні інформаційні системи екологічної безпеки. Навчальний посібник. Івано-Франківськ : Супрун В. П., 2016. 181 с.

⁶⁶⁵ Павличенко А.В. Дослідження екологічних наслідків розміщення вугледобувних підприємств у навколишньому середовищі / А.В. Павличенко, А.А. Коваленко. [Електронний ресурс] - <http://rr.nmu.org.ua/pdf/2014/20140926-68.pdf>

⁶⁶⁶ Кучерявий В. П., Генік Я. В., Дида А. П., Колодко М. М. Рекультивация та фітомеліорація : навчально-методичний посібник. Львів : ГАФСА, 2006. 116 с.

⁶⁶⁷ Триснюк В. М., Зорін Д. О., Волинець Т. В. Інформаційні системи мобільного екологічного моніторингу Дністровського каньйону. Телекомунікаційні та інформаційні технології. 2024. No 2(83). с. 60-67. DOI: 10.31673/2412-4338.2024.027280

⁶⁶⁸ Skrobala V., Popovych V., Pinder V. Ecological patterns for vegetation cover formation in the mining waste dumps of the Lviv-Volyn coal basin. Mining of Mineral Deposits. 2020. Vol. 14, no. 2. P. 119–127. <https://doi.org/10.33271/mining14.02.119>

Просторова модель розподілу кобальту (Co) демонструє виражену зональність із локальним максимумом концентрації в центральній частині досліджуваної ділянки, безпосередньо поблизу терикону (рис. 2). Зафіксовані значення суттєво перевищують як фонові рівні, так і встановлені гранично допустимі концентрації, що дозволяє ідентифікувати зону як екологічну аномалію⁶⁶⁹.

Концентрація кобальту знижується у міру віддалення від джерела забруднення, що свідчить про його здатність до міграції у ґрунтовому середовищі. Причиною такого процесу є фізико-хімічне вивітрювання мінералів відвальних мас та вилуговування металів унаслідок атмосферних впливів. Подібна структура забруднення характерна для зон із постійним техногенним пресингом, зумовленим тривалою експлуатацією гірничих підприємств⁶⁷⁰.

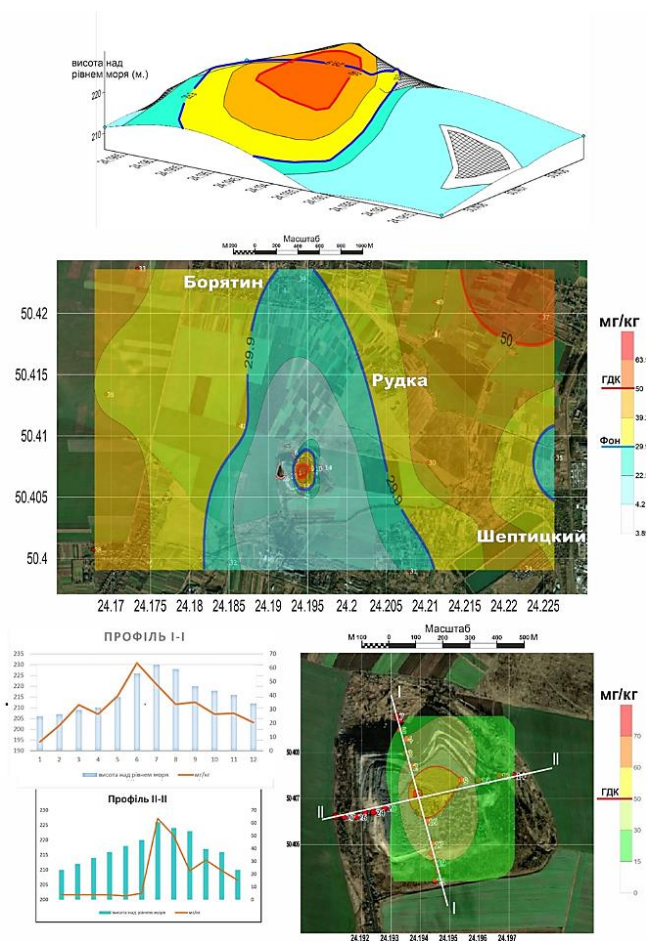


Рисунок 2. Просторовий розподіл кобальту (Co) у ґрунтах досліджуваної території

Просторове моделювання засвідчило наявність локальних осередків підвищеного вмісту важких металів, що вказує на переважно точковий характер техногенного впливу в межах досліджуваної території. Такий розподіл зумовлює необхідність подальшої деталізації забруднення з урахуванням особливостей міграції токсичних елементів у межах гірничопромислових ландшафтів.

Наступним об'єктом просторового аналізу є залізо (Fe) — природний компонент гірських порід, присутній у складі багатьох мінералів, що входять до структури відвальних мас. У результаті інтенсивного окиснення й вивітрювання залізистих мінералів відбувається його вивільнення у

⁶⁶⁹ Zorin, D. (2024). Assessment of the ecological status of soil cover and design of environmental monitoring in the Ivano-Frankivsk urban community. *Ecological Safety and Balanced Use of Resources*, 15(1), 39-52. <https://doi.org/10.69628/esbur/1.2024.39>

⁶⁷⁰ Босак П. В., Попович В. В. Екологічна небезпека підтериконових стічних вод Нововолинського гірничопромислового району *EcoLab*. Том 1: моногр. Львів: ЛДУБЖД, 2022. 231 с.

грунтове середовище, що може істотно змінювати хімічні характеристики ґрунтів і впливати на біотичні компоненти екосистем⁶⁷¹.

Побудована картографічна модель вмісту Fe дозволила виявити просторову диференціацію забруднення та локалізувати ділянки з підвищеним його накопиченням (рис. 3).

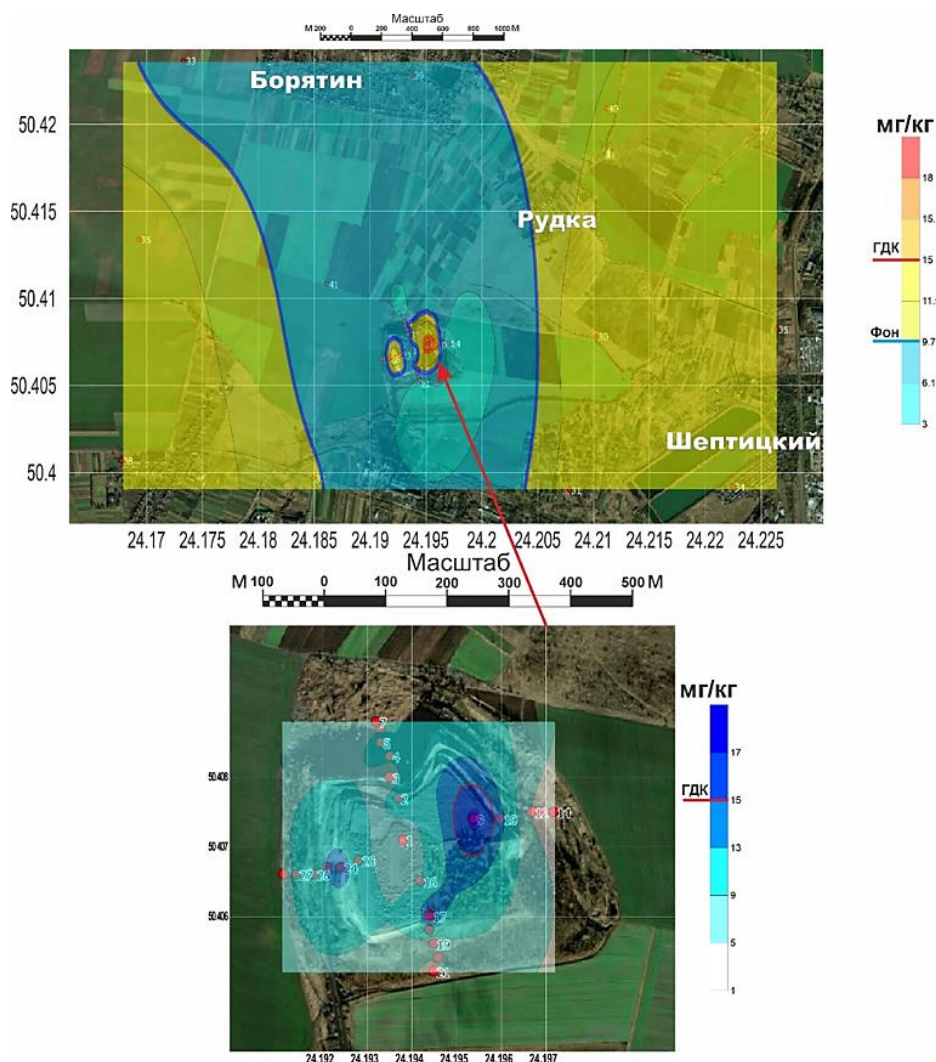


Рисунок 3. Просторовий розподіл заліза (Fe) у ґрунтах досліджуваної території

Просторовий аналіз вмісту заліза (Fe) у ґрунтах досліджуваної ділянки виявив локалізовані зони його підвищеної концентрації, переважно в межах центральної частини терикону та прилеглих схилів. Такий розподіл може бути зумовлений мінералогічними особливостями відвальних порід та тривалим впливом атмосферних факторів, що сприяють вивільненню й переміщенню залізовмісних сполук у ґрунтове середовище.

Наступним об'єктом просторового аналізу став кадмій (Cd) — один із найбільш токсичних важких металів, здатний спричиняти значну екологічну шкоду навіть за мінімальних концентрацій. Його потрапляння у ґрунтове середовище створює ризики для біоти через можливість включення в трофічні ланцюги. Основними джерелами забруднення є техногенні породи з вмістом промислових

⁶⁷¹ Босак П. В., Стокалюк О. В., Корольова О. Г., Попович В. В. Управління екологічною безпекою у проєктах розвитку гірничопромислових комплексів. Вісник Львівського державного університету безпеки життєдіяльності. 2020, № 22. С. 5–11. <https://doi.org/10.32447/20784643.22.2020.01>

домішок та сполук кольорових металів. Просторова модель розподілу Cd дозволила ідентифікувати локалізовані ділянки з підвищеним вмістом елементу, що вказує на точковий характер забруднення (рис. 4).

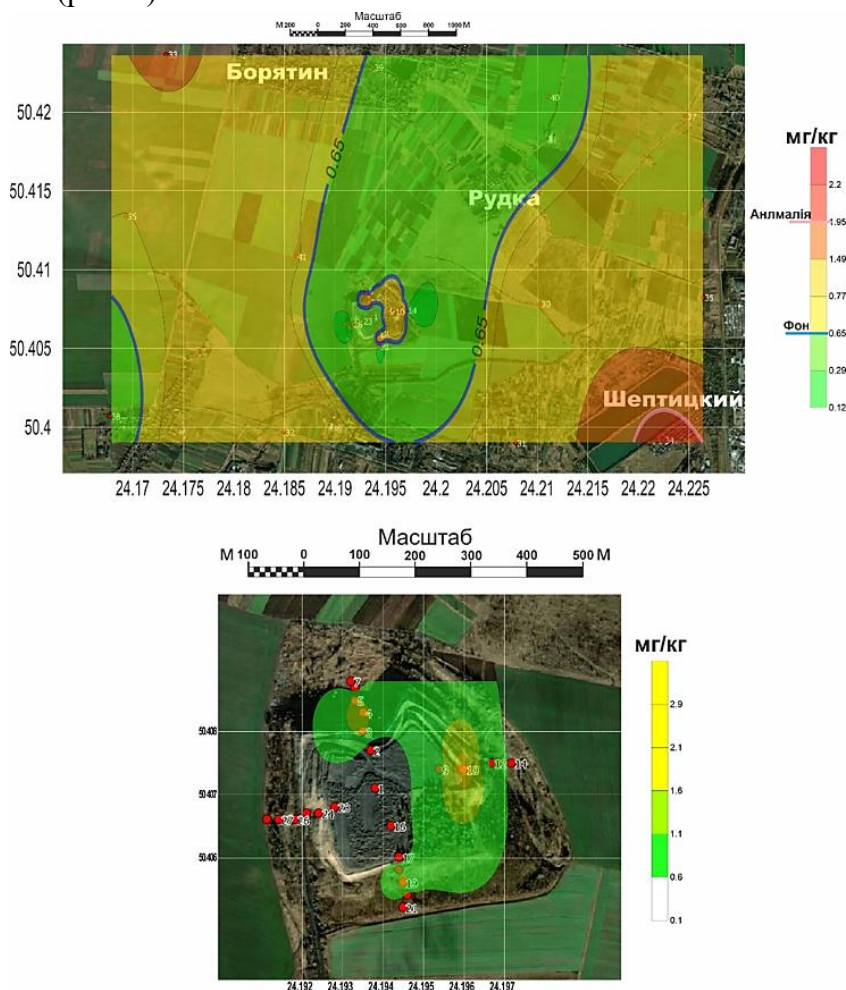


Рисунок 4. Просторовий розподіл кадмію (Cd) у ґрунтах досліджуваної території

Просторовий розподіл кадмію (Cd) засвідчує локалізацію його підвищених концентрацій у центральній частині терикону, з акцентом на східні та південні схили.

Незважаючи на те, що зафіксовані значення не перевищують гранично допустимих концентрацій, вони істотно перевищують фонові рівні, що свідчить про наявність техногенного навантаження. Такий характер розподілу зумовлений вертикальною і горизонтальною міграцією елементу, обумовленою поверхневим стоком і вітровою ерозією порід⁶⁷².

Аналіз просторового розподілу свинцю (Pb), оскільки він демонструє чітко локалізовану зону підвищених концентрацій, обмежену територією терикону та прилеглими схилами (рис. 5).

⁶⁷² Кучерявий В. П. Фітогенне поле і фітомеліорація: питання теорії та практики. Науковий вісник НЛТУ України. 2016. Т. 26, № 7. С. 15–24. <https://doi.org/10.15421/40260714>

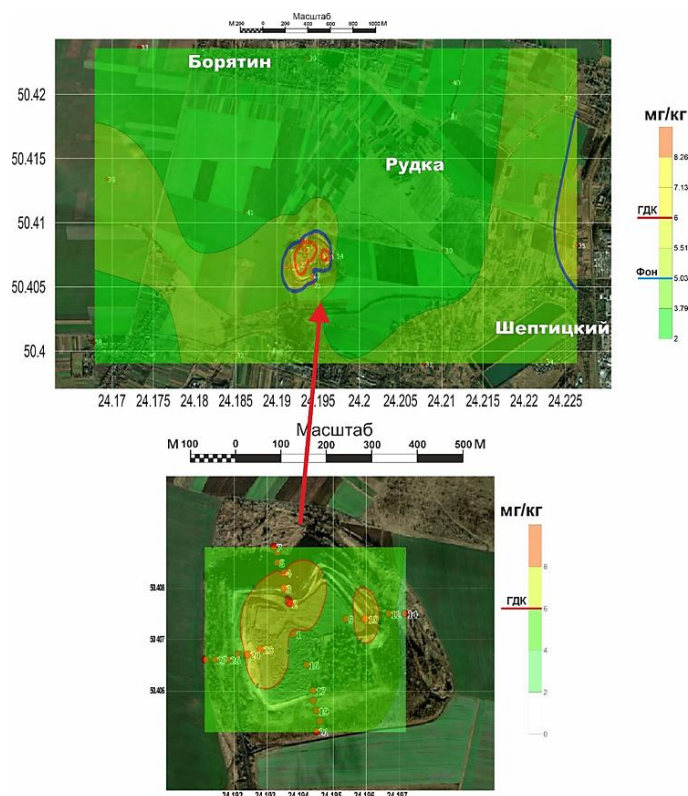


Рисунок 5. Просторовий розподіл свинцю (Pb) у ґрунтах досліджуваної території

Найінтенсивніше накопичення спостерігається на південно-західному схилі, де концентрації перевищують як фонові показники, так і встановлену гранично допустиму концентрацію. Такий розподіл, імовірно, зумовлений поєднанням історичних факторів техногенного навантаження та природних процесів сорбції металів у ґрунтовому профілі. З огляду на високу токсичність і здатність свинцю до біоаккумуляції, виявлені значення потребують подальшого моніторингу в рамках програм фіторекультиваци^{673,674}.

На основі отриманих значень сумарного показника забруднення (Z_c) було побудовано картосхему просторового розподілу інтегрального забруднення ґрунтів, що дозволяє візуалізувати екологічну ситуацію в межах досліджуваної території (рис. 6).

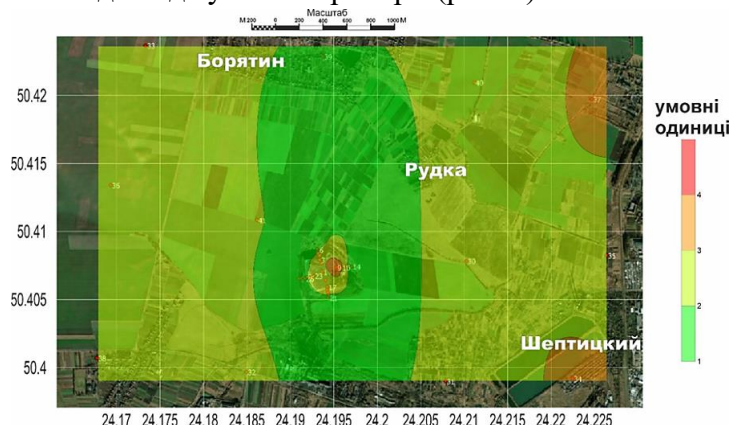


Рисунок 6. Сумарний показник забруднення ґрунтів терикону

⁶⁷³ Піндер В. Ф., Попович В. В., Босак П. В. Рекультиваційні заходи зниження техногенного впливу породних відвалів вугільних шахт на довкілля EcoLab. Том 2 : монографія. Львів : ЛДУБЖД, 2023. 245 с.

⁶⁷⁴ Попович В. В., Волощизин А. І. Екологічні особливості формування фітомеліоративного вкриття на териконах вугільних шахт. Актуальні питання техногенної та цивільної безпеки України : Зб. матеріалів І Всеукр. наук. конф. Миколаїв : Видавець Торубара В.В., 2018. С. 86–87

На основі результатів просторового аналізу встановлено, що ґрунти в зоні впливу терикону належать до категорії допустимого забруднення. Хоча концентрації окремих елементів перевищують фонові значення, більшість із них залишаються в межах гранично допустимих концентрацій. Це свідчить про збереження екологічної функціональності ґрунту та можливість проведення контрольованих фітомеліоративних заходів.

Підвищені концентрації свинцю та кобальту, зафіксовані в окремих точках, вказують на екологічну небезпеку локального рівня та необхідність пріоритетного моніторингу в цих ділянках. Отримані дані формують основу для подальшого оцінювання фітотоксичності та планування заходів з екологічної реабілітації порушених ландшафтів.

Просторовий аналіз гідрохімічного складу стічних вод породного відвалу

Формування техногенних ландшафтів у межах вугільнодобувних регіонів супроводжується появою поверхневих і фільтраційних вод, що контактують із відвальними масами. У результаті інфільтрації атмосферних опадів та фільтрації крізь породи відбувається вилигування хімічних елементів, передусім потенційно токсичних металів, що змінює гідрохімічний склад дренажних вод⁶⁷⁵.

Актуальність моніторингу таких процесів зумовлена нестачею ефективних стратегій управління якістю водного середовища у гірничопромислових районах. Екологічний аналіз гідрохімічних показників дає змогу не лише оцінити ступінь забруднення, а й виявити джерела токсичних компонентів та обґрунтувати необхідні заходи з мінімізації їхнього впливу.

У межах дослідження було проаналізовано фізико-хімічні показники стічних вод, сформованих на поверхні досліджуваного породного відвалу. Визначення вмісту основних хімічних елементів якімали максимальні показники (Fe, Mn, Ca, Mg, K) здійснювалось за стандартними методиками на базі лабораторії БУВРу.

Екологічне оцінювання якості стічних вод здійснювалась шляхом відбору проб на визначених геоекологічних полігонах (рис. 7), а також з урахуванням аналітичних даних, наданих іншими установами та організаціями.

Проби води відбирались у чотирьох основних точках (північна, південна, західна та східна частини терикону), що дозволило оцінити вплив морфології об'єкта на інтенсивність забруднення. Просторове картографування гідрохімічних параметрів дало змогу ідентифікувати осередки найбільшого навантаження, встановити напрямки міграції токсичних компонентів та визначити зони потенційного екологічного ризику для прилеглих екосистем.

Результати дослідження свідчать про активні геохімічні процеси, зумовлені вивітрюванням, окисненням мінералів та вилигуванням порід, що призводить до утворення характерного гідрохімічного профілю з ознаками техногенного впливу.

Для візуалізації просторового розподілу концентрацій забруднюючих речовин у стічних водах було створено серію тематичних карт, які відображають поширення окремих хімічних елементів у межах досліджуваних ділянок.

⁶⁷⁵ Попович В.В. Вплив кліматичних умов на розвиток рослинності техногенних ландшафтів Малого Полісся у зимовий період, *Науковий вісник НЛТУ України*, 19.3, 2009. С. 37–42.



Рисунок 7. Карта локалізації точок відбору проб стічних вод у межах досліджуваної території

Побудова карт просторового розподілу хімічних елементів у стічних водах здійснювалась за тією ж методикою, що й для ґрунтів, із використанням системи ГІС-аналізу.

Візуалізація просторового розподілу марганцю (Mn) у складі стічних вод проводилась з урахуванням фонових рівнів та граничних значень, що визначають межі аномального накопичення. Побудовані ізолінії демонструють чітку градацію концентрацій — від фонових навантажень до критичних значень. Просторовий розподіл свідчить про активну міграцію металу з масиву терикону в поверхневе водне середовище, що створює потенційну загрозу для екосистем і потребує подальшого контролю в межах екологічного моніторингу (рис. 8).

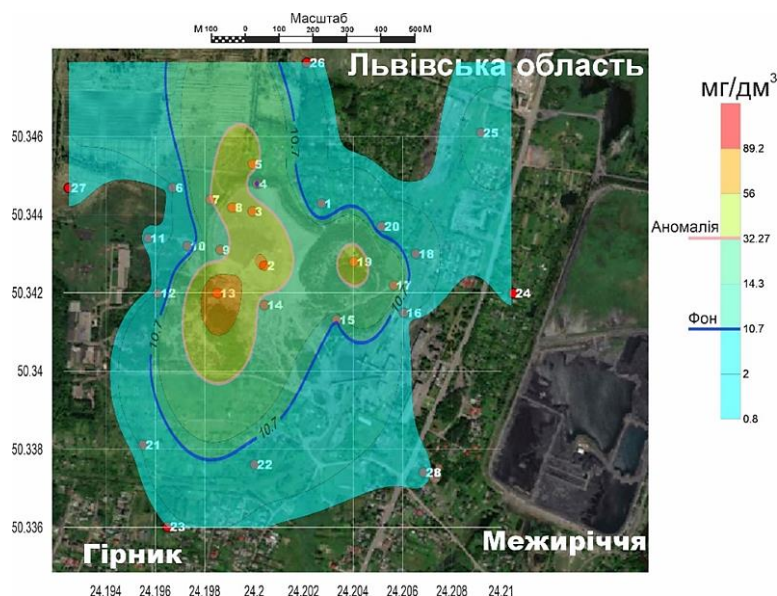


Рисунок 8. Просторовий розподіл марганцю (Mn) у стічних водах досліджуваного терикону

Наступним елементом, вміст якого було досліджено у стічних водах території впливу терикону, є калій (K). Просторова модель розподілу концентрацій калію дозволяє виявити рівень його накопичення на території впливу терикону, а також визначити потенційні напрямки міграції зони забруднення (рис. 9).

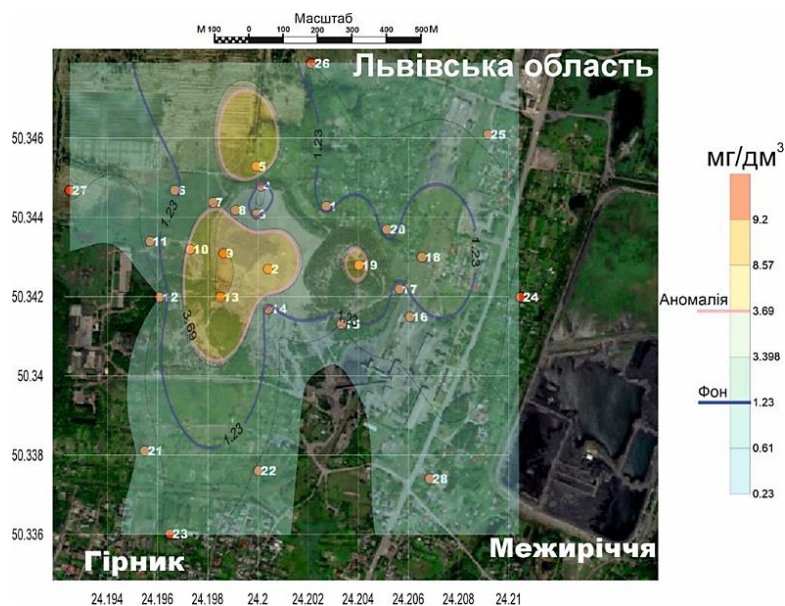


Рисунок 9. Просторовий розподіл калію (К) у стічних водах досліджуваного терикону

Картографічна модель концентрацій калію (К) дозволила виокремити зони з локальними перевищеннями над регіональним фоном, що вказує на наявність техногенних аномалій. Просторове накладання результатів на супутникові знімки забезпечило точну ідентифікацію географічного положення забруднених ділянок і дало змогу визначити потенційні напрямки міграції елементу в межах гідрологічної структури території.

Наступним елементом оцінювання у складі стічних вод, є магній (Mg). Просторовий розподіл магнію (Mg) у складі стічних вод демонструє виражену нерівномірність із локальними зонами концентрації, що суттєво перевищують фонові значення (рис. 10).



Рисунок 10. Просторовий розподіл магнію (Mg) у стічних водах досліджуваного терикону

Найбільш інтенсивне накопичення зафіксовано в центральній та північно-східній частинах відвалу, що свідчить про техногенне походження елементу внаслідок гідродинамічної міграції розчинених форм. У південних секторах території вміст магнію є відносно стабільним і наближається до природного фону. Виявлені аномалії, імовірно, пов'язані з фільтраційними потоками, які спрямовують забруднювачі в напрямку прилеглих територій.

Просторовий розподіл кальцію (Ca) у стічних водах демонструє концентрацію підвищених значень у центральній частині території, що межує з тілом терикону (рис. 11). Поступове зниження вмісту елементу в напрямку периферії вказує на характерне для техногенних ландшафтів розсіювання забруднення. Джерелом надходження кальцію, ймовірно, є вилуговування легкорозчинних карбонатних і сульфатних сполук з порід відвалу, що активізується під впливом атмосферної вологи та інфільтраційних процесів. Надмірна концентрація кальцію у водному середовищі може порушувати кислотно-лужну рівновагу, що негативно впливає на життєдіяльність водних організмів. У разі потрапляння таких вод на поверхню ґрунту можливе виникнення процесів луговіння, зміна структури ґрунтового профілю та зниження його агропродуцційної якості⁶⁷⁶.

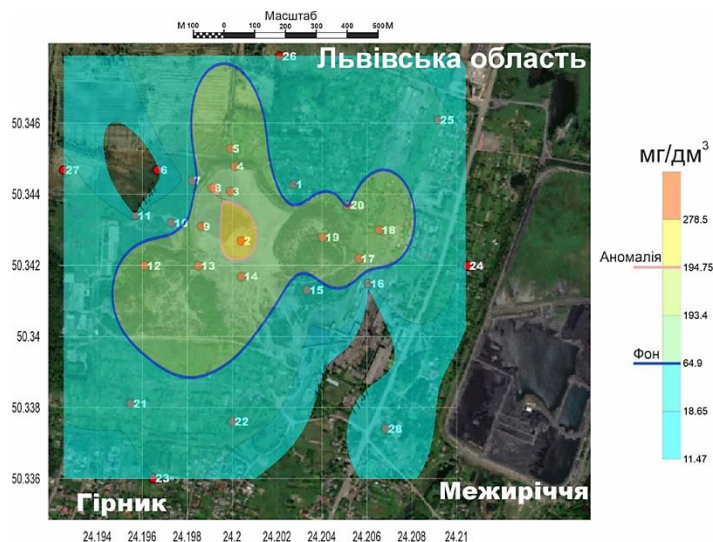


Рисунок 11. Просторовий розподіл кальцію (Ca) у стічних водах досліджуваного терикону

Аналогічно для проб стічних вод також був здійснений розрахунок сумарного показника забруднення (Zc), та побудовано сумарну карту поширення забруднення, що дозволяє оцінити загальне техногенне навантаження за сукупністю вмісту кількох пріоритетних хімічних елементів (рис. 12).

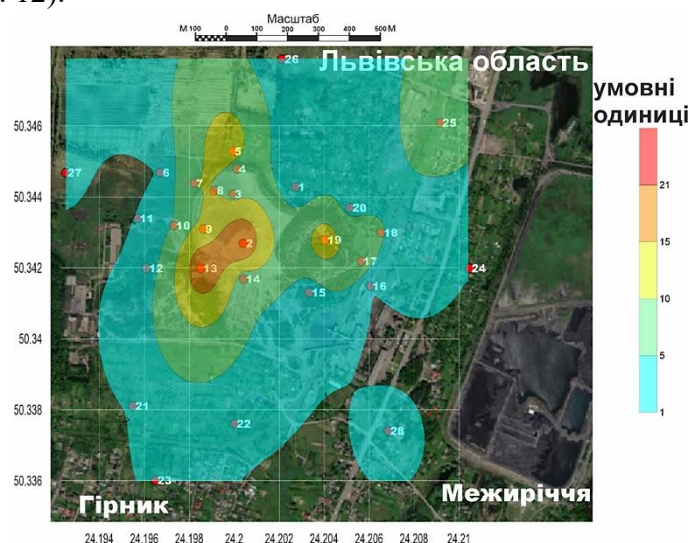


Рисунок 12. Сумарний показник забруднення стічних вод досліджуваного об'єкту

⁶⁷⁶ Попович В.В. Полігони твердих побутових відходів у вироблених кар'єрах, ярах, траншеях і особливості їх фітомеліорації, Науковий вісник НЛТУ України, 22.11, 2012. С. 119–128.

Результати дослідження стічних вод, сформованих у зоні впливу породного відвалу, засвідчили суттєву просторову варіабельність вмісту хімічних елементів, що відображає неоднорідність джерел забруднення та складну геохімічну динаміку процесів. Найбільші відхилення від фонових значень виявлено для марганцю, магнію, кальцію та калію, що, ймовірно, пов'язано з процесами вилугування елементів із відвальних мас і їх подальшою гідродинамічною міграцією.

Аналіз інтегрального показника забруднення (Zc) дозволив ідентифікувати ділянки з найбільш інтенсивним техногенним впливом. Просторові моделі розподілу елементів підтверджують наявність прямої залежності між рівнем забруднення водного середовища та морфологічними особливостями техногенних об'єктів. Отримані результати становлять наукову основу для визначення пріоритетних територій, що потребують природоохоронного втручання та планування рекультиваційних заходів.

Просторовий аналіз радіаційного фону в межах території впливу терикону

Одним із чинників техногенного навантаження, пов'язаного з вуглевидобувною діяльністю, є зміна природного радіаційного фону.

Під впливом вивітрювання, ерозійних і окисних процесів активізується міграція радіоактивних елементів, що зумовлює підвищення рівня радіаційного навантаження на прилеглі екосистеми. Сукупність геоморфологічних та гідрометеорологічних чинників формує умови для можливого локального перевищення природного γ -фону⁶⁷⁷.

У межах дослідження здійснено вимірювання потужності еквівалентної дози γ -випромінювання на різних ділянках поверхні породного відвалу шахти та в зоні його впливу. Основна мета - виявити просторові закономірності поширення іонізуючого випромінювання та оцінити потенційні ризики для довкілля й населення прилеглих територій.

Для візуалізації просторового розподілу потужності еквівалентної дози гамма-випромінювання у зоні впливу терикону побудовано картографічну модель на основі даних проведених вимірювань (рис. 13).



Рисунок 13. Просторовий розподіл потужності еквівалентної дози γ -випромінювання на території впливу породного відвалу

⁶⁷⁷ Попович В.В., 'Фітомеліорація згасаючих териконів Львівсько-Волинського вугільного басейну': монографія. Львів: ЛДУБЖД, 2014. 173 с.

Картографічна модель потужності еквівалентної дози γ -випромінювання виявила локальні зони підвищеної радіаційної активності, переважно в центральній частині відвалу, що свідчить про техногенне навантаження. Водночас більшість вимірних значень залишаються в межах нормативів радіаційної безпеки. Зафіксовані перевищення носять локальний характер і не мають тенденції до просторового поширення. Порівняння з природним фоном сусідніх територій підтверджує відносну стабільність радіаційної ситуації на більшості ділянок.

Проективне покриття та фітоценотична характеристика поверхні породного відвалу

З метою комплексної екологічної оцінки стану деградованих техногенних ландшафтів, важливим етапом дослідження є аналіз рослинного покриву, який слугує біоіндикатором стабільності екосистеми. Оцінювання проективного покриття поверхні породного відвалу дозволяє визначити ступінь природного самовідновлення, типи угруповань та рівень фітомеліоративного потенціалу території. Дослідження проводилось на різних експозиціях схилів терикону, що дало змогу порівняти фітоценотичну структуру залежно від орографічних та мікрокліматичних умов.

З метою візуалізації особливостей розподілу рослинного покриву на досліджуваному териконі, було побудовано карту просторового розподілу проективного покриття, що дозволяє оцінити рівень фіторозвитку в межах техногенно порушеної території (рис. 14).

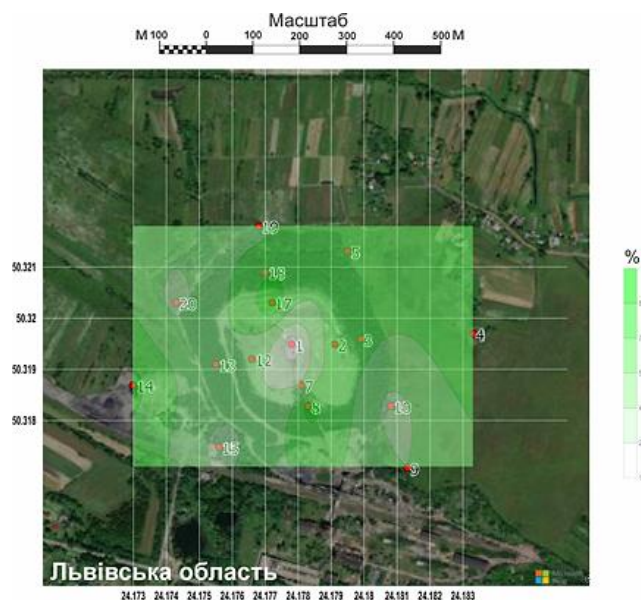


Рисунок 14. Просторовий розподіл проективного покриття рослинності на території досліджуваного породного відвалу

На карті зображено просторовий розподіл проективного покриття рослинності (%) з диференціацією за кольоровою шкалою — від низьких значень (<25 %) до високих (>85 %). Найвищі показники зосереджені в центральній частині породного відвалу, що свідчить про більш сприятливі умови для формування рослинного покриву. Периферійні ділянки, де зафіксовано мінімальні значення, ймовірно зазнають впливу ерозійних процесів, ущільнення субстрату чи підвищеної мінералізації.

Застосування картографічного підходу дозволяє виявити локальні зони з високим фітомеліоративним потенціалом, а також ділянки ризику подальшої деградації. Така візуалізація є ефективним інструментом оцінювання екологічного стану території та планування заходів з фіторекультиватії.

Коефіцієнт фітомеліоративної ефективності як інтегральний показник стану рослинного покриву

З метою кількісної оцінки екологічної ролі рослинного покриву на поверхні породного відвалу використано показник коефіцієнта фітомеліоративної ефективності (КФЕ). Цей індикатор дозволяє інтегрально відобразити фітореакцію біоценозу на умови субстрату та рівень техногенного навантаження, поєднуючи морфометричні характеристики рослин, щільність покриття й екологічну стійкість фітоценозу. Застосування КФЕ дає змогу порівняти фітомеліоративний потенціал різних ділянок відвалу та виявити пріоритетні зони для проведення реабілітаційних заходів.

Візуалізація результатів у вигляді тематичної карти дозволяє просторово інтерпретувати рівень фітосукцесійних процесів і визначити ділянки з найменшою екологічною стійкістю, які потребують першочергового втручання.

На основі отриманих результатів польових досліджень було створено картографічну модель просторового розподілу коефіцієнта фітомеліоративної ефективності (КФЕ) у межах зони впливу терикону (рис. 15).

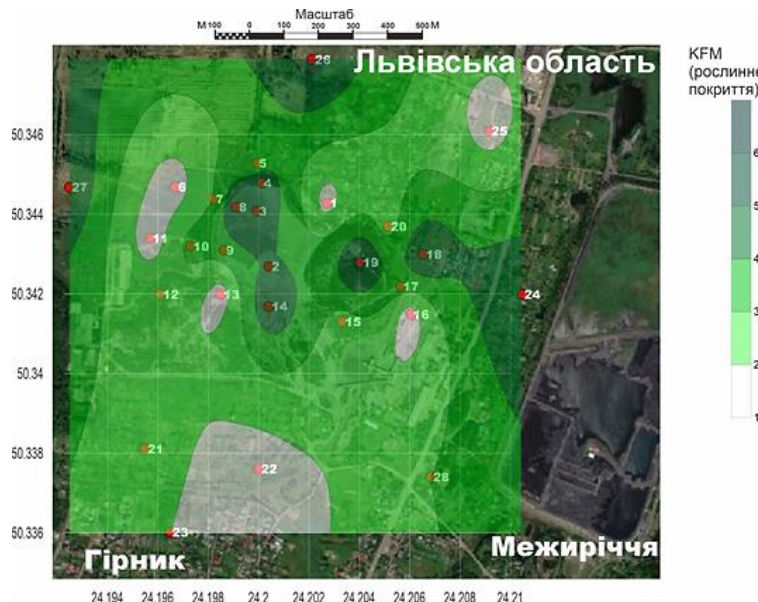


Рисунок 15. Картографічна модель просторового розподілу коефіцієнта фітомеліоративної ефективності (КФЕ) рослинного покриву на території терикону

Отримана картографічна модель розподілу значень КФЕ дала змогу виокремити зони з найнижчими показниками, які становлять екологічний пріоритет у контексті фіторекультивативних заходів. Водночас виявлені ділянки з підвищеним КФЕ демонструють потенціал до ренатуралізації без залучення значних ресурсів.

Результати проведеного оцінювання фітомеліоративної ефективності рослинного покриву на поверхні породного відвалу засвідчили виражену просторову варіабельність рівня фітосукцесійних процесів. Максимальні значення КФЕ зафіксовані на контрольних ділянках за межами техногенного об'єкта, що свідчить про сприятливі природні умови для розвитку рослинності. Високі показники також відзначено на західних і північних схилах, де фіторозвиток відбувається інтенсивніше.

Натомість на вершинах терикону та його південному схилі КФЕ знижується, що пов'язано з несприятливими умовами для проростання: ущільненням субстрату, низькою аерацією та обмеженою водопроникністю.

Встановлений вплив морфологічних характеристик рельєфу, а також фізико-хімічних властивостей порід, підтверджує необхідність диференційованого підходу до рекультивації.

Розроблення рекомендацій щодо підвищення рівня екологічної безпеки

На основі узагальнення результатів екологічного оцінювання території впливу породного відвалу було здійснено просторове зонування з урахуванням рівня деградації ландшафтів, інтенсивності техногенного навантаження.

Результатом стала картографічна модель, яка дозволяє виокремити ділянки з різним ступенем придатності до впровадження фіторекультиваційних заходів (рис. 16). Такий підхід є основою для формування диференційованих рекомендацій щодо реабілітації порушених екосистем і підвищення рівня екологічної безпеки у межах гірничопромислового району.



Рисунок 16. Картографічна модель зонування території за доцільністю впровадження фіторекультиваційних заходів у межах зони впливу терикону

На основі просторового аналізу та значень КФЕ виділено п'ять функціональних зон, кожна з яких потребує різного підходу до рекультивації.

Зона 5 (червона) охоплює найбільш деградовані ділянки з критично низькими значеннями КФЕ. У цій зоні спостерігається найвищий рівень техногенного навантаження, що вимагає впровадження інтенсивних фітомеліоративних заходів. Доцільним є використання адаптованих до екстремальних умов видів рослин з високою стійкістю до забруднення.

Зона 4 (помаранчева) характеризується значним екологічним порушенням, однак має ознаки часткової самовідновлюваності. Для цієї зони рекомендовано реалізацію комбінованого підходу — технічне вирівнювання мікрорельєфу, локальне вапнування, збереження вологи та покращення структури субстрату.

Зона 3 (жовто-зелена) є перехідною, з помірним рівнем порушення, де можливе застосування малозатратних методів рекультивації. Доцільно впроваджувати екстенсивні агротехнічні заходи, зокрема посів сидератів, застосування мульчі та стимуляцію природної фітосукцесії з мінімальним людським втручанням.

Зона 2 (блакитна) демонструє ознаки екологічної стабілізації та має високий потенціал до самовідновлення. Основним завданням є підтримка існуючого стану шляхом довгострокового

моніторингу. Доцільно формувати експериментальні ділянки для вивчення природних механізмів регенерації та збереження біорізноманіття.

Зона 1 (темно-зелена) представлена ділянками з високими значеннями КФЕ, які перебувають у задовільному екологічному стані. Тут фіксується активна природна сукцесія рослинності. Ці території доцільно зберігати у статусі контрольних еталонних ділянок, що можуть використовуватись для наукового супроводу та екологічного спостереження.

Таким чином, інтеграція результатів екологічного моніторингу, картографічного моделювання та фітоіндикаторного аналізу дозволила сформувати просторово диференційовану стратегію реабілітації території, порушеної діяльністю вугільної промисловості. Виділення функціональних зон відповідно до рівня деградації та показників КФЕ є ефективним інструментом для прийняття обґрунтованих рішень щодо типу та інтенсивності фіторекультивацийних заходів. Запропонована модель може бути адаптована для інших гірничопромислових регіонів України, що підвищує її прикладне значення в контексті екологічного управління деградованими ландшафтами.

ВИСНОВКИ

У результаті дослідження, обґрунтовано інтегральний підхід до екологічного оцінювання вугільних відвалів з урахуванням фізико-хімічних, біоіндикаційних, геоінформаційних та фітомеліоративних параметрів. Запропоновані методологічні підходи дозволили комплексно охарактеризувати екологічний стан територій, трансформованих вугільною промисловістю, та надати практичні рекомендації щодо їх відновлення.

Оцінювання рівня природної ренатуралізації з використанням коефіцієнта фітомеліоративної ефективності (КФЕ) дозволило визначити просторові закономірності фітоценотичного покриття та встановити ділянки з високим, середнім і низьким фіторекультивацийним потенціалом. Інтеграція результатів у геоінформаційну систему забезпечила побудову серії тематичних карт, які візуалізують рівень екологічної загрози, ступінь фітосукцесії та функціональне зонування території.

Розроблена картографічна модель пріоритетного впровадження фіторекультивацийних заходів має важливе практичне значення для формування регіональних програм з екологічної реабілітації техногенно порушених ландшафтів. Запропоноване зонування сприяє ефективному плануванню природоохоронних дій відповідно до ступеня деградації території та її потенціалу до відновлення.

Отримані результати є науковим підґрунтям для вдосконалення екосистемного підходу в управлінні посттехногенними ландшафтами та можуть бути використані органами місцевого самоврядування, екологічними службами й землекористувачами під час розробки планів рекультивациї, оцінювання ризиків та моніторингу стану довкілля у гірничопромислових регіонах.