

МОДЕЛЬ КАСКАДНИХ ГЕОХІМІЧНИХ ЕФЕКТІВ ПРОМИСЛОВОГО ВИДОБУТКУ ТОРФУ НА СУМІЖНІ ПРИРОДООХОРОННІ ОБ'ЄКТИ

Вергельська Н.В.¹, Власенко О.В.², Покшевницький А.С.³

¹Державна установа «Науковий центр гірничої геології, геоекології та розвитку інфраструктури
Національної академії наук України»
бульв. Академіка Вернадського, 34Б, 03142, м. Київ

²Державна наукова установа «Інститут екологічного відновлення та розвитку України»
вул. Василя Липківського Митрополита 35, корп. 2, 03035, м. Київ

³Державна установа «Інститут геохімії навколишнього середовища
Національної академії наук України»
пр. Академіка Палладіна, 34А, 03142, м. Київ

vergelska@nas.gov.ua, olegvvvv@gmail.com, ap.2000.orcid@gmail.com

Торфовища – своєрідні довготривалі геохімічні акумулятори важких металів та природних радіонуклідів, проте промисловий видобуток торфу принципово порушує таку функцію, запускаючи каскад взаємопов'язаних геохімічних трансформацій. Незважаючи на зростаючу кількість публікацій щодо окремих аспектів впливу торфовидобування на довкілля, інтегрований концептуальний фреймворк, що пов'язує такі процеси з конкретними шляхами міграції та реципієнтами природоохоронного значення, у науковій літературі відсутній. У праці представлено оригінальну концептуальну модель каскадних геохімічних ефектів промислового видобутку торфу. Модель може слугувати теоретичною та методологічною основою для проведення польових верифікаційних досліджень та розроблення науково обґрунтованих проєктів рекультиватії торфових кар'єрів неподалік природоохоронних об'єктів. Вона побудована на основі систематичного синтезу рецензованої наукової літератури та апробована на прикладі низинного торфового родовища у долині р. Десна (Броварський район, Київська область), що безпосередньо межує з НПП «Залісся», розташоване в межах об'єкту Смарагдової мережі UA0000233 «Київське Подесіння». Модель визначає осушення як єдиний тригерний вплив, що одночасно активує чотири геохімічні процеси-тиски: мобілізацію важких металів унаслідок зміни окисно-відновного потенціалу та рН, окислення піриту з формуванням кислого дренажу, аеробну мінералізацію органічної речовини з вивільненням розчиненого органічного вуглецю (РОВ) та слідових металів, і механічну деструкцію торфу під час видобутку з генерацією металомісного пилу. Три шляхи міграції – підземні води, поверхневий стік та атмосферне осадження – забезпечують надходження забруднювачів до чотирьох категорій реципієнтів: р. Десна, четвертинний водоносний горизонт, ґрунти та лісові екосистеми НПП «Залісся» і водно-болотний комплекс Смарагдової мережі. Окремий модуль природних радіонуклідів відображає вимоги обов'язкового радіологічного моніторингу (NORM) відповідно до законодавства України у сфері радіаційної безпеки (НРБУ-97). Модель забезпечує відтворену методологічну основу для геохімічної оцінки ризиків до початку видобутку та для розроблення програм рекультиватії об'єктів видобутку мінеральної сировини різних типів, що знаходяться неподалік природоохоронних об'єктів. *Ключові слова:* геохімія торфовищ; видобуток торфу; модель SPPRC; мобілізація важких металів; розчинений органічний вуглець; оцінка впливу на довкілля; Смарагдова мережа; рекультиватія.

A Cascade Geochemical Effects Model of Industrial Peat Extraction on Adjacent Protected Areas. Vergelska N., Vlasenko O., Pokshevnytskyi A.

Peatlands are long-term geochemical accumulators of heavy metals and naturally occurring radionuclides; however, industrial peat extraction fundamentally disrupts this function by triggering a cascade of interrelated geochemical transformations. Despite a growing body of publications on individual aspects of peat extraction impacts on the environment, an integrated conceptual framework linking these processes to specific migration pathways and receptors of conservation significance remains absent from the scientific literature. This paper presents an original conceptual model of cascade geochemical effects of industrial peat extraction. The model is designed to serve as the theoretical and methodological foundation for field-based verification studies and the development of scientifically grounded reclamation projects for peat quarries. The model was constructed through systematic synthesis of peer-reviewed scientific literature and applied to a lowland peat deposit in the Desna River valley, Brovary district, Kyiv Region, which is in direct boundary contact with Zalissia National Nature Park and located within Emerald Network object UA0000233 «Kyivske Podesinnia». The model identifies drainage as the single trigger that simultaneously activates four geochemical pressure processes: heavy metal mobilisation due to changes in redox potential and pH, pyrite oxidation with acid drainage formation, aerobic mineralisation of organic matter



with release of dissolved organic carbon (DOC) and trace metals, and mechanical destruction of peat during extraction generating metal-enriched particulate matter. Three migration pathways – groundwater, surface runoff, and atmospheric deposition – convey contaminants to four receptor categories: the Desna River, the quaternary aquifer, the soils and forest ecosystems of Zalissia National Nature Park, and the Emerald Network wetland complex. A dedicated naturally occurring radioactive materials (NORM) module reflects the mandatory radiological monitoring requirements under Ukrainian radiation safety legislation (NRBU-97). The model provides a replicable methodological framework for geochemical risk assessment prior to extraction and for the development of reclamation programmes for mineral extraction sites of various types. *Key words:* peatland geochemistry; peat extraction; SPPRC model; heavy metal mobilisation; dissolved organic carbon; environmental impact assessment; Emerald Network; reclamation

Постановка проблеми. Торфовища займають близько 3% суходолу планети, акумулюючи майже третину запасів ґрунтового вуглецю, що робить їх непропорційно важливими у глобальних біогеохімічних циклах і кліматорегуляції [1, 2]. З геохімічної точки зору торфовища є довготривалими акумуляторами важких металів, металоїдів і природних радіонуклідів завдяки відновлювальним умовам постійного водонасичення та винятковій комплексуючій здатності гумінових і фульвокислот, частка яких може сягати 60–70% загальної органічної маси [3]. Ця акумулятивна функція визначає подвійну екологічну роль торфовищ: інтактні торфовища слугують природними геохімічними бар'єрами, тоді як будь-яке антропогенне порушення, що руйнує редокс-рівновагу, здатне перетворити їх на джерела вивільнення токсичних речовин в суміжні екосистеми [4].

Промисловий видобуток торфу залишається одним із найбільш геохімічно деструктивних видів порушення торфовищ. Осушення, як обов'язковий підготовчий етап видобутку, знижує рівень ґрунтових вод і переводить торфовий матрикс з анаеробних відновлювальних умов в аеробні окислювальні, запускаючи каскад взаємопов'язаних геохімічних трансформацій: мобілізацію раніше іммобілізованих важких металів, окислення піриту і формування кислого дренажу, аеробну мінералізацію органічної речовини з вивільненням розчиненого органічного вуглецю (РОВ) і поживних речовин, а також генерацію металовмісного пилу при механічному фрезеруванні [5, 6]. Ці процеси не функціонують ізольовано, вони відбуваються одночасно, взаємодіють між собою і поширюються через численні шляхи міграції, зрештою впливаючи на реципієнти далеко за межами ліцензійної площі [7].

Актуальність дослідження. В основу дослідження покладено фреймворк Джерело–Тиск–Шлях–Реципієнт–Наслідок (SPPRC) як методологічна основа моделювання каскадних геохімічних ефектів видобутку торфу. Такий підхід розширює класичну модель Джерело–Шлях–Реципієнт (SPR), що широко застосовується в менеджменті забруднених земель, шляхом явного виокремлення геохімічних процесів-тисків від тригерного впливу-джерела та додавання рівня наслідків, що інтегрує кумулятивні впливи на реципієнтів. Це розширення особливо актуальне для торфових систем, де єдина тригерна подія – осушення – одночасно активує множини геохімічних процесів, що поширюються

через різні шляхи міграції до просторово розподілених реципієнтів. Модель призначена забезпечити теоретичну і методологічну основу для наступних польових верифікаційних досліджень і проектування рекультивації.

Зв'язок авторського доробку із важливими науковими та практичними завданнями. Представлені результати пов'язані з актуальними завданнями геохімічного моніторингу та екологічної оцінки наслідків видобутку мінеральної сировини в Україні. Розроблена концептуальна модель каскадних геохімічних ефектів відповідає пріоритетним напрямкам державної екологічної політики у сфері охорони природно-заповідного фонду, раціонального використання надр та рекультивації порушених земель. Практичне значення роботи полягає у створенні методологічного інструменту для інтегрованої геохімічної оцінки ризиків при видобутку мінеральної сировини та науково обґрунтованого проектування рекультивації на об'єктах, розташованих у геохімічному впливі природоохоронних територій.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Останні дослідження щодо динаміки важких металів у торфових ґрунтах при зміні типу землекористування [3] свідчать про пряму залежність між ступенем антропогенного порушення торфовища і пулом металів, що переходять у біодоступні форми. Дослідження експорту розчиненого органічного вуглецю з осушених торфовищ до поверхневих водних об'єктів [8] показали що масштаби цього процесу мають глобальне значення і суттєво залежать від характеру землекористування на торфовищі. Щодо емісій парникових газів, дослідження різних стратегій їх скорочення на порушених торфовищах [9] засвідчили що жоден із розглянутих підходів не є універсальним і що вибір стратегії визначається передусім геохімічними умовами конкретного об'єкту. Дослідження поствидобувної ренатуралізації торфовищ [10] встановили що відновлення екологічної стійкості можливе, проте потребує науково обґрунтованого визначення геохімічних цілей рекультивації, досягнення яких забезпечує відновлення природних функцій торфовища.

Разом з тим, незважаючи на значний масив публікацій щодо окремих аспектів впливу торфорозробок, єдиного концептуального фреймворку, що інтегрує ці процеси в когерентну каскадну модель із прив'язкою до конкретних шляхів міграції, реципієнтів природоохоронного значення і цілей рекультивації, у науковій літературі досі немає. Наявні підходи

«Джерело–Шлях–Реципієнт» (SPR), широко застосовані в менеджменті забруднених земель [11], не знайшли систематичного застосування для оцінки геохімічних ефектів видобутку торфу, і жоден з них не визначав геохімічні цільові показники для проектування рекультивації після видобутку.

Виділення невирішених раніше частин загальної проблеми. Відсутність інтегрованого геохімічного фреймворку для оцінки впливу торфорозробок є особливо актуальною проблемою для України. Країна налічує близько 1 562 розвіданих торфових родовищ із загальними запасами 1 853 млн тонн [12], значна частина яких розташована в безпосередній близькості до природоохоронних об'єктів. Київська область зосереджує близько 10% загальноукраїнських запасів торфу з концентрацією родовищ у поліській зоні вздовж долин річок Десна, Ірпінь та Трубіж [13]. Посадження активного торфовидобутку з просторовою суміжністю об'єктів Смарагдової мережі і національних природних парків формує геохімічні профілі ризику, що не описуються жодною з існуючих моделей оцінки впливу: відсутній інтегрований інструментарій, який би пов'язував геохімічні процеси-тиски з конкретними шляхами міграції, реципієнтами природоохоронного значення і цілями рекультивації в єдиній каскадній структурі.

Саме цій невирішеній частині загальної проблеми присвячена дана стаття. Розроблена оригінальна концептуальна модель Джерело–Тиск–Шлях–Реципієнт–Наслідок (модель SPPRC) каскадних геохімічних ефектів видобутку торфу призначена слугувати теоретичною і методологічною основою для польових верифікаційних досліджень та розроблення науково обґрунтованих проєктів рекультивації. Модель апробовано на прикладі низинного торфового родовища у долині р. Десна, Броварський район, Київська область, що безпосередньо межує з НПП «Залісся» і розташоване в межах об'єкту Смарагдової мережі UA0000233 «Київське Подесіння».

Новизна. Уперше розроблено оригінальну концептуальну модель SPPRC (Джерело–Тиск–Шлях–Реципієнт–Наслідок) каскадних геохімічних ефектів промислового видобутку торфу, що, на відміну від класичного підходу SPR (Джерело–Шлях–Реципієнт), явно виокремлює геохімічні процеси-тиски як самостійний ієрархічний рівень і інтегрує обов'язкові вимоги NORM-моніторингу відповідно до законодавства України. Уперше формалізовано каскадну причинно-наслідкову структуру, що пов'язує єдиний тригерний вплив (осушення) з чотирма одночасними геохімічними процесами-тисками, трьома шляхами міграції та чотирма категоріями реципієнтів природоохоронного значення в єдиній відтворюваній концептуальній структурі. Уперше інтегровано спеціалізований модуль природних радіонуклідів, що визначає шляхоспецифічну поведінку частково-зв'язаних і водорозчинних форм

радіонуклідів для потреб геохімічної оцінки ризиків на об'єктах видобутку торфу поблизу природоохоронних територій.

Методологічне або загальнонаукове значення. Розроблений фреймворк SPPRC забезпечує відтворювану методологічну основу для геохімічної оцінки ризиків видобутку мінеральної сировини різних типів на об'єктах, розташованих у геохімічному впливі природоохоронних територій. У загальнонауковому вимірі запропонований підхід демонструє принцип розрізнення тригерного впливу і активованих ним процесів як методологічно важливий крок у моделюванні каскадних геохімічних трансформацій. Модель також визначає геохімічно специфічні цілі рекультивації, що є методологічним внеском у проектування поствидобувної рекультивації торфових родовищ: кожен захід мінімізації впливу ідентифікується на конкретному рівні каскаду (Джерело, Тиск, Шлях), що підвищує спрямованість та обґрунтованість природоохоронних заходів.

Викладення основного матеріалу. Концептуальна модель побудована в чотири послідовних кроки.

Крок 1 – Ідентифікація джерела. Первинний антропогенний тригер визначено шляхом систематичного аналізу опублікованої літератури з геохімії осушення торфовищ і перегляду звіту з оцінки впливу на довкілля (ОВД) для торфового родовища у долині р. Десна, Броварський район, Київська область. Осушення підтверджено як обов'язковий підготовчий етап промислового видобутку торфу, що незворотно змінює окисно-відновні умови торфового матриксу.

Крок 2 – Класифікація процесів-тисків. Геохімічні процеси, що активуються осушенням, класифіковано за чотирма категоріями відповідно до домінуючого механізму: (i) зміна окисно-відновного потенціалу та pH з мобілізацією важких металів; (ii) окислення піриту з формуванням кислого дренажу; (iii) аеробна мінералізація органічної речовини з вивільненням РОВ, амонійного азоту та слідових металів (Fe, Mn); (iv) механічна деструкція торфу при видобутку з генерацією металовмісного пилу. Критерії класифікації отримано з рецензованої літератури (2020–2025 рр.).

Крок 3 – Визначення шляхів міграції та реципієнтів. Виділено три шляхи міграції: підземні води, поверхневий стік та атмосферне осадження. Реципієнти визначені на основі просторової конфігурації кейс-стаді: р. Десна з притоками, четвертинний водоносний горизонт місцевого водопостачання, ґрунти та лісові екосистеми НПП «Залісся», об'єкт Смарагдової мережі UA0000233 «Київське Подесіння».

Крок 4 – Інтеграція модуля природних радіонуклідів. До моделі включено спеціалізований модуль природних радіонуклідів, що відображає обов'язкові вимоги радіологічного моніторингу відповідно до законодавства України у сфері радіаційної безпеки.

Згідно із Законом України «Про використання ядерної енергії та радіаційну безпеку» (№ 39/95-ВР) [14] і Нормами радіаційної безпеки України (НРБУ-97) [15], усі підприємства, що провадять видобуток мінеральної сировини, зобов'язані здійснювати щорічну радіологічну оцінку порід родовища. Модуль формалізує геохімічні шляхи міграції природних радіонуклідів від місця видобутку до суміжних реципієнтів – шляхи, що не охоплюються стандартними радіологічними обстеженнями робочих місць.

Модель апробовано на прикладі низинного торфового родовища у долині р. Десна, Броварський район, Київська область, Україна ($50^{\circ}38' - 50^{\circ}39'$ пн. ш., $30^{\circ}45' - 30^{\circ}46'$ сх. д.). Родовище відноситься до низинного типу трясковинно-осоково-очеретяного підтипу і розташоване на лівобережній надзаплавній терасі р. Десна, за 2–3 км від русла. Південна межа об'єкту дослідження безпосередньо межує з НПП «Залісся», а його територія входить до складу об'єкту Смарагдової мережі UA0000233 «Київське Подесіння». Основні параметри об'єкту, використані в моделі: середня потужність торфового покладу 1,1 м; середній ступінь розкладу 24,3%; середня вологість 89,1%; середня зольність 24,0%; глибина залягання четвертинного водоносного горизонту 0,8–1,7 м; безпосередній контакт із межею НПП «Залісся» (південна межа); валовий викид пилу при фрезеруванні 0,00063 г/с.

Розроблена концептуальна модель каскадних геохімічних ефектів видобутку торфу включає п'ять ієрархічних рівнів: Джерело, Тиск, Шлях, Реципієнт та Наслідок, доповнених рівнем Реагування, що відображає заходи мінімізації впливу і рекультивациі (рис. 1).

Модель побудована як спрямований каскад, в якому єдина тригерна подія – джерело, поширюється через множину одночасних процесів-тисків і розгалужених шляхів міграції, зрештою впливаючи на просторово розподілені реципієнтів з формуванням кумулятивних геохімічних наслідків на рівні екосистем. Модуль природних радіонуклідів інтегрований як наскрізний елемент, що відображає поведінку забруднювачів на рівнях Тиску і Шляху відповідно до обов'язкових вимог NORM-моніторингу. Участь природних радіонуклідів (NORM) у шляхах міграції розглядається лише за умови перевищення встановлених порогових значень питомої активності, визначених відповідно до чинних нормативів радіаційної безпеки.

Тригерним впливом-джерелом визначено осушення торфового масиву, що є обов'язковим підготовчим етапом промислового видобутку. Осушення знижує рівень ґрунтових вод на 1,5–2,0 м через систему осушувальних каналів, незворотно переводячи геохімічне середовище торфового матриксу з анаеробних відновлювальних умов в аеробні окислювальні. Цей перехід є ключовою подією, що запускає всі подальші геохімічні трансформації, оскільки іммобілізація важких металів в інтактних торфови-

щах фундаментально залежить від підтримання відновлювальних умов [3, 5]. На об'єкті дослідження осушення підтверджено як перший операційний етап до початку видобутку. Середня потужність торфу 1,1 м у поєднанні з малою глибиною залягання четвертинного водоносного горизонту (0,8–1,7 м) означає, що осушувальні канали пронизують увесь торфовий профіль і формують пряме гідравлічне з'єднання між окисленим горизонтом торфу і шляхом підземних вод, суттєво підвищуючи ризик переносу забруднювачів на рівень реципієнтів.

Виявлено чотири геохімічні процеси-тиски, що одночасно активуються осушенням (рис. 1):

Процес 1 – Зміна окисно-відновного потенціалу та pH з мобілізацією важких металів. Перехід від відновлювальних до окислювальних умов дестабілізує металоорганічні комплекси, утворені між важкими металами та гуміновими і фульвокислотами. Раніше іммобілізовані в торфовому матриксі метали, зокрема Cd, Pb, Cu, Zn, вивільнюються в ґрунтовий розчин у біодоступних формах. Ступінь мобілізації металів прямо пропорційний масштабу осушення і зольності торфу [3]. На об'єкті дослідження середня зольність 24,0% і низький ступінь розкладу 24,3% свідчать про високий залишковий акумулятивний потенціал і, відповідно, значний пул металів, що можуть мобілізуватись.

Процес 2 – Окислення піриту і формування кислого дренажу. Контакт сульфідних мінералів з атмосферним киснем в умовах осушення ініціює окислення піриту з генерацією сірчаної кислоти і двовалентного заліза. Утворений кислий дренаж характеризується низьким pH та підвищеними концентраціями Fe^{2+} , SO_4^{2-} і співмобілізованих слідових металів. Цей процес додатково посилює мобільність важких металів, знижуючи pH торфу і конкуруючи з органічною речовиною за центри зв'язування металів [6, 16].

Процес 3 – Аеробна мінералізація органічної речовини. Розкладання гумінових і фульвокислот – основних хелатуючих агентів для важких металів у торфовому матриксі, частка яких може сягати 60–70% органічної маси – вивільняє металоорганічні комплекси в ґрунтовий розчин і генерує підвищені концентрації розчинених органічних речовини POP, амонійного азоту (NH_4^+) та слідових металів Fe і Mn у дренажних водах [6, 17]. Показано, що деградовані торфовища суттєво ускладнюють підготовку питної води у нижніх водозборах через підвищене надходження POB [6, 8]. Низький ступінь розкладу торфу (24,3%) на об'єкті дослідження свідчить про наявність значного пулу лабільної органічної речовини, доступної для аеробної мінералізації після осушення, що становить пряму загрозу для якості поверхневих вод басейну р. Десна.

Процес 4 – Механічна деструкція і пилова емісія. Фрезерування та збирання торфу генерують дрібнодисперсні частинки, збагачені важкими металами, що акумулювались у торфовому профілі протягом

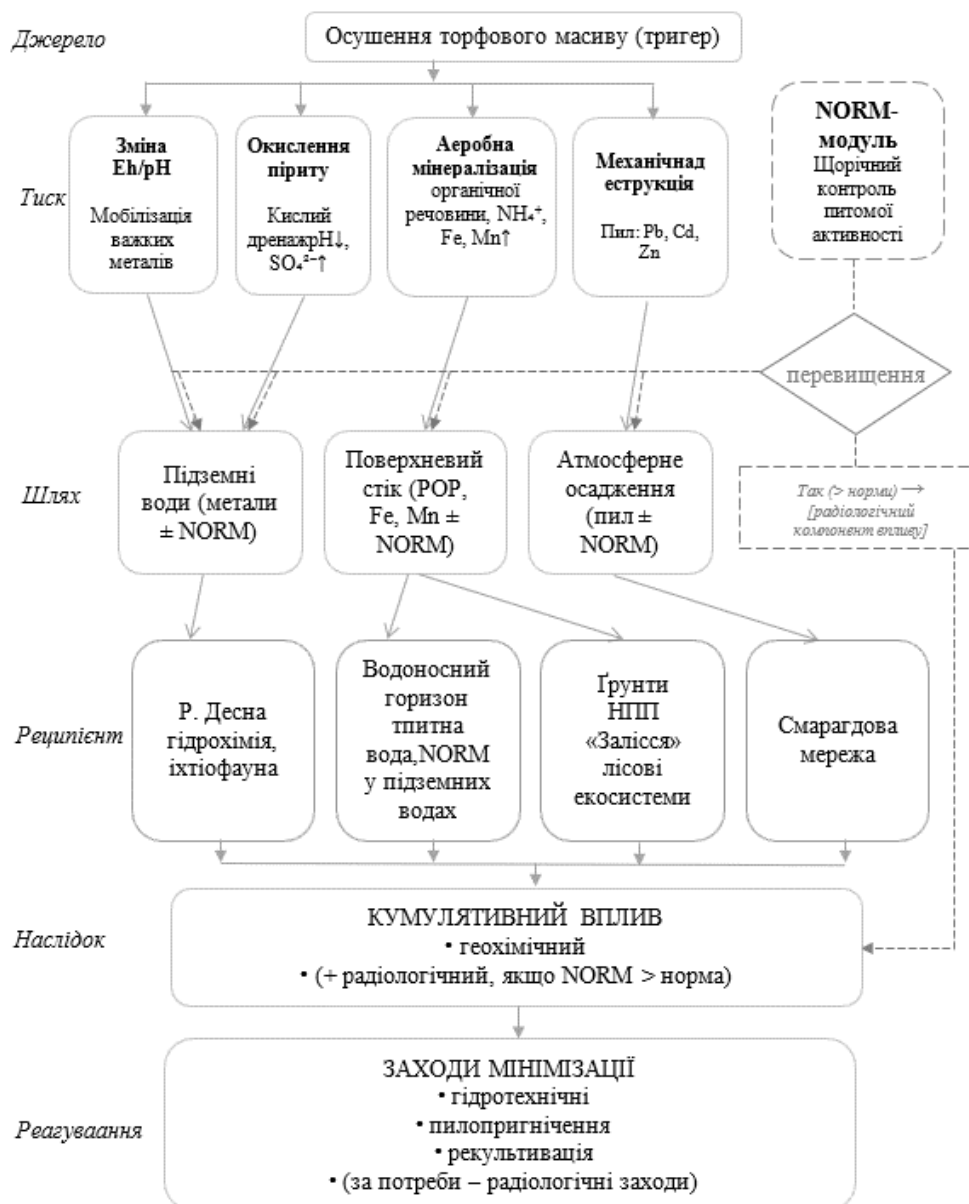


Рис. 1. Концептуальна модель каскадних геохімічних ефектів промислового видобутку торфу на суміжні природоохоронні екосистеми

тисячоліть. Атмосферне осадження металовмісного торф'яного пилу впливає на ґрунти та водойми в радіусі кількох кілометрів від кар'єру [9, 18]. На об'єкті дослідження валовий викид пилу при фрезеруванні становить 0,00063 г/с, з додатковим внеском від кар'єрного транспорту. Безпосередній контакт об'єкту з межею НПП «Залісся» робить атмосферне осадження торф'яного пилу особливо значущим природоохоронним ризиком.

Визначено три шляхи міграції забруднювачів до навколишнього середовища (рис. 1):

Шлях підземних вод. Індукована осушенням окислювальна трансформація торфового матриксу мобілізує природні радіонукліди і важкі метали, що здатні мігрувати вертикально до четвертинного водонос-

ного горизонту. Мала глибина залягання горизонту (0,8–1,7 м) на об'єкті дослідження формує короткий вертикальний шлях із прямими наслідками для якості підземних вод місцевого водопостачання [19, 20].

Шлях поверхневого стоку. Кислий дренаж і фільтрат, збагачений РОВ, транспортуються латерально через мережу осушувальних каналів до р. Десна та її приток. Цим шляхом до поверхневих водних об'єктів надходять підвищені концентрації Fe, Mn, РОВ та NH_4^+ з потенційним перевищенням нормативів для водойм рибогосподарського призначення [7, 17].

Шлях атмосферного осадження. Металовмісний торф'яний пил, що генерується при фрезеруванні і транспортуванні, осідає на ґрунтах, водних об'єктах і рослинності суміжних територій. Цей шлях

є основним вектором геохімічного впливу на лісові екосистеми НПП «Залісся» і водно-болотний комплекс Смарагдової мережі UA0000233 [9, 18].

Визначено чотири категорії реципієнтів на основі просторової конфігурації об'єкту дослідження:

– річка Десна з притоками отримує забруднювачі переважно шляхом поверхневого стоку з потенційними наслідками для гідрохімічного режиму, водної біоти та водокористування, включаючи рибне господарство і господарсько-питне водопостачання.

– четвертинний водоносний горизонт є основним реципієнтом шляху підземних вод з наслідками для якості питної води, зважаючи на використання мілких ґрунтових вод місцевим населенням.

– ґрунти та лісові екосистеми НПП «Залісся» отримують забруднювачі шляхом атмосферного осадження металовмісного торф'яного пилу з довгостроковим потенціалом акумуляції в лісовій підстилці та верхньому шарі ґрунту.

– об'єкт Смарагдової мережі UA0000233 «Київське Подесіння» є найширшою одиницею реципієнтів, що охоплює гідрологічно пов'язані водно-болотні та прибережні екосистеми Деснянського екологічного коридору, включаючи оселища, що охороняються Резолюцією № 4 Бернської конвенції.

Інтегрований до моделі модуль природних радіонуклідів (NORM) формалізує геохімічні шляхи міграції природних радіонуклідів від місця видобутку до суміжних реципієнтів – шляхи, що не охоплюються стандартними радіологічними обстеженнями робочих місць, але є суттєвими для оцінки кумулятивного впливу на суміжні природоохоронні екосистеми. Модуль визначає шлях підземних вод як основний вектор для водорозчинних форм радіонуклідів в умовах окислення торфу, а шлях атмосферного осадження, як основний вектор для частинково-зв'язаних форм. Таке розмежування потребує шляхоспецифічного дизайну програм моніторингу і є оригінальним внеском даної моделі порівняно з існуючими геохімічними фреймворками для оцінки торфорозробок.

Модель включає рівень Реагування, що відображає доступні заходи мінімізації і рекультивациі на двох часових горизонтах. У період активного видобутку: відстійники для зниження навантаження металів і зависі у дренажних водах; пилопригнічення на видобувних полях і дорогах; NORM-радіологічний і гідрохімічний моніторинг дренажних вод та суміжних водних об'єктів; сезонні обмеження фрезерних операцій у суху вітряну погоду для мінімізації атмосферного пиловнесення. В поствидобувній фазі найефективнішим у довгостроковій перспективі геохімічним рішенням, визначеним у літературі, є рекультивациа шляхом обводнення виробленого простору в поєднанні з рео вегетацією аборигенними водно-болотними видами, що відновлює відновлювальне геохімічне середовище, уповільнює мінералізацію залишкового органічного вуглецю і поступово повер-

тає торфовищу функції поглинача вуглецю та іммобілізатора металів [16, 17]. Цей підхід до рекультивациі безпосередньо спрямований на розрив геохімічних шляхів, визначених моделлю, шляхом усунення первинного джерела вивільнення забруднювачів.

Розроблена концептуальна модель розвиває існуючі підходи до оцінки впливу торфорозробок у кількох відношеннях. По-перше, попри широке застосування фреймворку SPR в менеджменті забруднених земель і промисловій оцінці ризиків, його систематичне використання стосовно видобутку торфу залишалося обмеженим у науковій літературі. Наявні дослідження впливу торфорозробок переважно розглядали окремі геохімічні процеси ізольовано без їх інтеграції в уніфіковану каскадну структуру, що явно відображає поширення впливів від джерела до реципієнта і визначає цілі рекультивациі. Модель SPPRC забезпечує таку інтегруючу структуру.

По-друге, явне виокремлення рівня Тиску від рівня Джерела – розрізнення тригерної події (осушення) і активованих нею геохімічних процесів – більш точно відображає механістичну реальність порушення торфовищ, ніж просте пов'язування «джерело–реципієнт». Це розрізнення має практичне значення, оскільки визначає точки причинно-наслідкового ланцюга, в яких найефективніше можуть бути застосовані заходи моніторингу і рекультивациі: пригнічення пилу на рівні Тиску, перехоплення забруднювачів на рівні Шляху або відновлення відновлювальних умов на рівні Джерела шляхом обводнення.

По-третє, інтеграція спеціалізованого модуля природних радіонуклідів, що відображає обов'язкові вимоги NORM-моніторингу відповідно до законодавства України у сфері радіаційної безпеки, є внеском, що не був раніше формалізований у геохімічних моделях для торфовищ. Визначаючи шляхоспецифічну поведінку частинково-зв'язаних та водорозчинних форм радіонуклідів, модуль уможливує розроблення більш цільових програм радіологічного моніторингу порівняно зі стандартними обстеженнями робочих місць.

Апробація моделі SPPRC на об'єкті у долині р. Десна виявляє геохімічний профіль ризику, що заслуговує особливої уваги з трьох причин. По-перше, низький середній ступінь розкладу торфу (24,3%) свідчить про те, що органічний матрикс зберігає високий акумулятивний потенціал і значний пул іммобілізованих забруднювачів, що вивільнятимуться при індукованому осушенні окисленні. По-друге, мала глибина залягання четвертинного горизонту (0,8–1,7 м) формує короткий вертикальний шлях міграції забруднювачів від окисленого горизонту торфу до підземних вод. По-третє, безпосередній контакт об'єкту дослідження з межею НПП «Залісся» означає, що всі три визначені шляхи, а саме: підземні води; поверхневий стік; атмосферне осадження, сходяться на природоохоронних екосистемах міжнародного значення.

Просторова конфігурація об'єкту дослідження, зокрема безпосередній контакт ліцензійної площі видобутку з межею НПП «Залісся», є прикладом геохімічного ризику, для якого існуючі методи оцінки впливу не мають інтегрованого інструментарію. Модель SPPRC є відтворюваною і придатна для застосування на об'єктах видобутку мінеральної сировини різних типів шляхом заміни об'єкто-специфічних параметрів на рівнях Тиску, Шляху та Реципієнта відповідно до характеристик конкретного об'єкту і його геохімічного оточення.

Основна прикладна цінність моделі SPPRC полягає в її здатності визначати геохімічно специфічні цілі рекультивації. Ідентифікуючи, які шляхи переносять які забруднювачі до яких реципієнтів, модель конкретизує завдання рекультивації: відновлення відновлювальних умов для припинення мобілізації важких металів і NORM (втручання на рівні Джерела); відновлення органічної речовини як хелатуючого матриксу для іммобілізації металів (рівень Тиску); реконструкція гідрологічної зв'язності для усунення шляхів кислого дренажу (рівень Шляху); реовегетація для зниження атмосферної пилової емісії (межа рівнів Тиску і Шляху).

Обводнення виробленого простору – захід рекультивації, на який найбільш прямо вказує модель – доведено відновлює функцію накопичення вуглецю і геохімічного бар'єру в поствидобувних торфовищах [21, 22]. Дана модель забезпечує шляхоспецифічне механістичне обґрунтування цього підходу, уможливаючи розроблення програм моніторингу рекультивації навколо конкретних геохімічних індикаторів, передбачених моделлю, а не загальних показників ренатуралізації.

Модель SPPRC має безпосереднє практичне значення для практики ОВД в Україні. Чинні процедури ОВД для видобутку торфу оцінюють геохімічні впливи фрагментарно – викиди пилу, класифікація відходів і водокористування розглядаються окремо, без інтегруючого фреймворку, що охоплює каскадні ефекти і кумулятивний вплив на реципієнтів. Впровадження підходу SPPRC до методології ОВД уможливить більш системне виявлення геохімічних ризиків, більш цільове проектування програм моніторингу і більш ґрунтовне обґрунтування вимог до рекультивації.

На регуляторному рівні модель підтримує доцільність інтеграції шляхоспецифічного NORM-моніторингу до вимог ОВД для об'єктів видобутку торфу і мінеральної сировини, оскільки стандартні радіологічні обстеження робочих місць не охоплюють міграцію забруднювачів до екологічних реципієнтів. Модель SPPRC забезпечує концептуальну основу для розширення програм моніторингу за межі санітарно-захисної зони на екологічно чутливих реципієнтів у зоні геохімічного впливу видобувних операцій.

Висновки. У праці означено та апробовано концептуальну модель SPPRC (Джерело–Тиск–Шлях–

Реципієнт–Наслідок) каскадних геохімічних ефектів промислового видобутку торфу, призначену слугувати теоретичною і методологічною основою для польових верифікаційних досліджень і розроблення проєктів рекультивації. Сформульовано такі висновки:

1. Осушення торфового масиву є єдиним тригерним впливом-джерелом, що одночасно активує чотири геохімічні процеси-тиски – мобілізацію важких металів унаслідок зміни окисно-відновного потенціалу та рН, окислення піриту і формування кислого дренажу, аеробну мінералізацію органічної речовини та генерацію металовмісного пилу – які функціонують одночасно і взаємно підсилюють один одного, спричиняючи кумулятивний геохімічний вплив за межами ліцензійної площі видобутку.

2. Фреймворк SPPRC, сформований на основі класичної моделі SPR, забезпечує структурно адекватний інструмент для інтеграції одночасних геохімічних процесів у когерентну каскадну модель, що явно пов'язує тригерні впливи з просторово розподіленими реципієнтами через визначені шляхи міграції, уможливаючи систематичне визначення пріоритетних параметрів моніторингу і цілей рекультивації.

3. Модуль природних радіонуклідів, що відображає обов'язкові вимоги NORM-моніторингу відповідно до законодавства України у сфері радіаційної безпеки (НРБУ-97, Закон № 39/95-ВР), формалізує шляхоспецифічну поведінку забруднювачів для частинково-зв'язаних і водорозчинних форм радіонуклідів, уможливаючи розроблення програм моніторингу, що виходять за межі стандартних радіологічних обстежень робочих місць і охоплюють вплив на екологічні реципієнти.

4. Апробація моделі на прикладі низинного торфового родовища у долині р. Десна (Броварський район, Київська область), що безпосередньо межує з НПП «Залісся» та розташоване в межах об'єкту Смарагдової мережі UA0000233, засвідчує, що кумулятивний геохімічний ризик видобутку на даному об'єкті поширюється на природоохоронні екосистеми міжнародного значення усіма трьома визначеними шляхами: підземними водами, поверхневим стоком і атмосферним осадженням.

5. Модель SPPRC формує геохімічне обґрунтування для проектування поствидобувної рекультивації та визначає три пріоритетні напрями подальших емпіричних досліджень: польове вимірювання концентрацій важких металів і активності NORM вздовж градієнту осушення на об'єкті дослідження для верифікації прогнозованих інтенсивностей шляхів; кількісна оцінка інтенсивності атмосферного пилового осадження і вмісту металів на межі з НПП «Залісся»; оцінка ефективності рекультивації, зокрема обводнення, у відновленні відновлювального геохімічного середовища і розриві визначених шляхів міграції забруднювачів.

Література

1. United Nations Environment Programme. Global peatlands assessment: The state of the world's peatlands. Nairobi, 2022. URL: <https://www.unep.org/resources/report/global-peatlands-assessment-state-worlds-peatlands> (дата звернення: 23.04.2026).
2. Mander Ü., Järveoja J., Maddison M., Soosaar K., Aavola R., Ostonen I., Salm J.-O. Global peatland greenhouse gas dynamics. *New Phytologist*. 2025. № 246. pp. 94–102. DOI: <https://doi.org/10.1111/nph.20436>.
3. Apori S. O., Giltrap M., Dunne J., Tian F. Human health and ecological risk assessment of heavy metals in topsoil of different peatland use types. *Heliyon*. 2024. № 10 (13). e33624. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2024.e33624>.
4. Boiaryn M., Nekos A., Radzii V., Netrobchuk I., Kotsun L., Lugowska M. 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. pp. 401–411. DOI: <https://doi.org/10.26565/2410-7360-2025-62-30>.
5. Li J., Liu Y., Wang H., Chen X. Geochemical regulation of heavy metal speciation in subtropical peatlands. *Land*. 2025. № 14(6). 1256. DOI: <https://doi.org/10.3390/land14061256>.
6. Williamson J., Evans C., Spears B., Pickard A., Chapman P. J., Feuchtmayr H., Leith F., Waldron S., Monteith D. Reviews and syntheses: Understanding the impacts of peatland catchment management on dissolved organic matter concentration and treatability. *Biogeosciences*. 2023. № 20. pp. 3751–3766. DOI: <https://doi.org/10.5194/bg-20-3751-2023>.
7. Pschenyckyj C. M., Clark J. M., Shaw P. J., Sizmur T. An examination of the influence of drained peatlands on regional stream water chemistry. *Hydrobiologia*. 2023. № 850. pp. 3313–3339. DOI: <https://doi.org/10.1007/s10750-023-05188-5>.
8. Rosset T., Binet S., Rigal F., Gandois L. Peatland dissolved organic carbon export to surface waters: Global significance and effects of land use. *Geophysical Research Letters*. 2022. № 49(5). e2021GL096616. DOI: <https://doi.org/10.1029/2021GL096616>.
9. Kibilds J., Abramenko K., Nikodemus O., Elferts D. Pros and cons of strategies to reduce greenhouse gas emissions from peatlands: Review of possibilities. *Applied Sciences*. 2024. № 14(6). 2260. DOI: <https://doi.org/10.3390/app14062260>.
10. Huth V., Jurasinski G., Günther A. Ecological resilience of restored peatlands to climate change. *Communications Earth & Environment*. 2022. № 3. 208. DOI: <https://doi.org/10.1038/s43247-022-00547-x>.
11. Stang C. Closing blank spots and illuminating blind spots in research on emerging contaminants: The source–pathway–receptor–impact–mitigation (SPRIM) continuum as an organizing framework. *Water*. 2023. № 15(3). 526. DOI: <https://doi.org/10.3390/w15030526>.
12. Державне науково-виробниче підприємство «Державний інформаційний геологічний фонд України». Державний баланс запасів корисних копалин України за 2023 р. Торф. Київ, 2024.
13. Державна служба геології та надр України. Інвестиційний атлас мінерально-сировинної бази Київської області. URL: <https://www.geo.gov.ua/wp-content/uploads/presentations/atlas/invest-atlas-kyiv-oblast.pdf> (дата звернення: 23.04.2026).
14. Про використання ядерної енергії та радіаційну безпеку : Закон України від 08.02.1995 № 39/95-ВР. URL: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/39/95-%D0%B2%D1%80#Text> (дата звернення: 23.04.2026).
15. Про введення в дію Державних гігієнічних нормативів «Норми радіаційної безпеки України (НРБУ-97)» : Постанова Головного державного санітарного лікаря України від 01.12.1997 № 62. URL: <https://zakon.rada.gov.ua/rada/show/v0062282-97#Text> (дата звернення: 23.04.2026).
16. Zak D., Goldhammer T., Cabezas A., Gelbrecht J., Gurke R., Wagner C., Reuter H. Treating acid mine drainage with decomposed organic soil: Implications for peatland rewetting. *Journal of Environmental Management*. 2022. № 313. 114984. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2022.114984>.
17. Frei R. J., Abbott B. W., Dupas R., Marttila H., Peiffer S. Impact of peat extraction on downstream concentrations and attenuation of dissolved organic carbon and nutrients. *Water Resources Research*. 2024. № 60(9). e2024WR037397. DOI: <https://doi.org/10.1029/2024WR037397>.
18. Abolins-Abols M., Samariks V., Lazdins A. Carbon losses from topsoil in abandoned peat extraction sites due to ground subsidence and erosion. *Land*. 2023. № 12. 2153. DOI: <https://doi.org/10.3390/land12122153>.
19. Holiaka D., Yoschenko V., Kashparov V., Levchuk S., Protsak V., Tschiersch J. ⁹⁰Sr and ¹³⁷Cs distribution in Chernobyl forests. *Journal of Environmental Radioactivity*. 2025. № 281. 107582. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jenvrad.2025.107582>.
20. Labunska I., Levchuk S., Kashparov V., Holiaka D., Yoschenko L., Santillo D., Johnston P. Current radiological situation in areas of Ukraine contaminated by the Chernobyl accident: Part 2. Strontium-90 transfer to culinary grains and forest woods from soils of Ivankiv district. *Environment International*. 2021. № 146. 106282. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.envint.2020.106282>.
21. Atkinson C. L., Alibašić H. Issues of peatland restoration across scales: A review and meta-analysis. *Water*. 2025. Vol. 17, № 16. 2428. DOI: <https://doi.org/10.3390/w17162428>.
22. Nugent K. A., Strachan I. B., Strack M., Roulet N. T. When do restored and reclaimed peatlands regain their typical carbon sink function? URL: <https://uwaterloo.ca/can-peat/news/when-do-restored-and-reclaimed-peatlands-regain-their> (дата звернення: 23.04.2026).

Дата першого надходження статті до видання: 27.03.2026

Дата прийняття статті до друку після рецензування: 24.04.2026

Дата публікації (оприлюднення) статті: 29.05.2026