

БИОРЕМЕДІАЦІЯ ЗАБРУДНЕНИХ ЗЕМЕЛЬ: СУЧАСНІ УКРАЇНСЬКІ ТЕХНОЛОГІЇ ТА СВІТОВІ ПІДХОДИ

БАШЛАЙ С.В. – доктор філософії, доцент

orcid.org/0000-0002-2247-5440

Сумський національний аграрний університет

СВИСТУНОВА Н.Л. – судовий експерт

orcid.org/0009-0005-3623-5703

Український науково-дослідний інститут спеціальної техніки та судових експертиз

Постановка проблеми. У зв'язку з наростаючим рівнем хімічного забруднення ґрунтів, однією з найважливіших проблем біогеохімії в даний час є вивчення поведінки ксенобіотиків у ґрунті, а також розробка способів їх рекультивації. Найбільш перспективним методом рекультивації ґрунтів вважається біоремедіація *in situ*, заснована на здатності ґрунтових мікроорганізмів повністю розкласти органічні забруднювачі або перетворювати їх на нетоксичні продукти. Цей підхід відрізняється високою економічністю, екологічністю та низькою енергоємністю. Однак далеко не завжди вибір робиться на його користь, особливо у разі сильно забруднених ґрунтів. Найчастіше вдаються до радикальніших методів очищення шляхом утилізації забрудненого ґрунту і подальшого його спалювання або поховання.

Особливу роль у очищенні ґрунту від токсикантів відіграє біоремедіація, що використовує метаболічний потенціал рослин та мікроорганізмів. Застосування біологічних методів відновлення ґрунту забезпечує екологічну безпеку та економічну вигоду. У зв'язку з цим актуальним є вивчення процесів відновлення забруднених земель і оцінка ефективності різних підходів. Металоплавильні підприємства представляють ризики забруднення територій в Україні, пов'язані як із аеральним надходженням із виробництв, і забрудненням великих територій під час зберігання відходів. А військова агресія росії, може призвести до руйнування реакторів, цілісності хвостосховищ та інших потенційно небезпечних об'єктів, що призведе до стихійного лиха. Можливі аварії та викиди з цих об'єктів в результаті витоків або пилоутворення радіоактивних відходів і радону з відкритих хвостосховищ можуть завдати серйозної шкоди навколишньому середовищу, ґрунтам та понад 24 млн осіб.

Основні проблеми біоремедіації пов'язані з труднощами адаптації мікроорганізмів у токсичних середовищах, а також з високою ймовірністю міграції забруднювачів у суміжні середовища. Внаслідок 30-річних досліджень поведінки політантів різних класів було показано [1], що внесення різних природних сорбентів може суттєво розширити можливості біоремедіації ґрунтів за умов *in situ*. У цій роботі буде узагальнено досвід багаторічних досліджень з розробки біотехнологій сорбційної біоремедіації ґрунтів, забруднених політантами різних класів, що знаходяться в різних ґрунтово-кліматичних умовах, як на території України, так і інших країн світу, заснованих на застосуванні методу сорбційної

біоремедіації з використанням натуральних (не синтетичних) сорбентів різних класів.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Для більшості країн світу серйозною проблемою є утворення значних обсягів небезпечних для здоров'я людини та навколишнього середовища відходів. У тимчасовій динаміці немає тенденції суттєвого їх скорочення, а для більшості країн світу, навпаки, обсяги небезпечних відходів щорічно зростають. Огляд останніх літературних джерел [2-4], показав ефективність біопрепарату «Бакойл-KZ» для біологічної рекультивації нафтозабруднених ґрунтів. Ось деякі ключові характеристики цього препарату: «Бакойл-KZ» тримає вуглеводневі мікроорганізми, які ефективно окислюють вуглеводні нафти за різних умов (рН 5,5–9,5 та температури від +10 до +40 °C). Препарат знижує токсичність нафтозабрудненого ґрунту, сприяє його відновленню і не надає шкідливого впливу на інші екосистеми. Простий у використанні: наноситься на забруднений ґрунт методом дощування.

У дослідженні [4] підкреслюється висока нафтоокислювальна активність «Бакойл-KZ». Препарат показав значне зниження вмісту нафтопродуктів у ґрунті, підтверджуючи його ефективність у біоремедіації. Дослідження [5] демонструє, що оптимальне дозування «Бакойл-KZ» складає 2 г/кг, що забезпечує найкращі результати з розкладання нафтопродуктів. Застосування менших доз показало менший ефект, а надлишкові дози сприяли зниження ефективності. Автори [6] досліджували два біопрепарати: «Бакойл-KZ» та «Міко». Результати показали, що «Бакойл-KZ» продемонстрував більш високу ефективність відновлення ґрунтової мікрофлори. Дослідження [7] підтвердило, що «Бакойл-KZ» у дозі 2 г/кг є найбільш ефективним в поліпшенні фізичних та хімічних властивостей ґрунту. У статті [8] описується значимість «Бакойл-KZ» для екологічного становлення забруднених територій та його висока ефективність у біоремедіації ґрунтів. В цілому автори відзначають позитивні сторони біопрепарату «Бакойл-KZ», що полягають в ефективності розкладання вуглеводнів, присутніх у нафті. Препарат містить мікроорганізми, які є безпечними для навколишнього середовища та сприяють відновленню ґрунтової мікрофлори. Препарат може бути використаний для очищення ґрунтів, забруднених різними видами нафтопродуктів, включаючи бензин та дизельне паливо.

Дослідження [9] показало, що мікроорганізм *Mixrobacterium lacticum* може ефективно використовуватися для біоремедіації нафтових забруднень завдяки його здатності до розкладання вугілля та адаптації до умов забруднених ґрунтів. Своєю здатністю до біоремедіації забруднених ґрунтів, включаючи вуглеводні, завдяки високій активності гідролізу та метаболічної пластичності відомий і мікроорганізм *Arthrobacter terregens*. Інформація про використання *Misgosossis roseus* обмежена, проте штами *Pseudomonas*, до яких, можливо, відносяться мікроорганізми, відомі своєю здатністю до біоремедіації різних вуглеводнів, включаючи бензин та дизельне паливо, через окислення їх до більш легко розкладаються з'єднань відома [10]. Загалом ці мікроорганізми ефективно взаємодіють з нафтопродуктами у ґрунті, прискорюючи їх деструкцію та покращуючи стан забруднених територій.

Мета статті – проаналізувати ризики від забруднення промисловими стоками земельних ресурсів України, та проаналізувати світові підходи.

Матеріали та методика досліджень. Для здійснення дослідження було використано такі *методи*: систематизація матеріалу, наукове узагальнення, порівняння. Вони дозволили виявити та усвідомити просторову диференціацію та різноманітність факторів, що надають вплив на стан земельних ресурсів у різних природних та соціально-економічних умовах; систематизувати та узагальнити ризики, що виникають під час використання біоремедіації. В статті проаналізовано різні методи хімічного аналізу ґрунтів для визначення вмісту органічних політантів та їх метаболітів у ґрунті, зокрема методи ГРХ, хроматомас-спектрометрії.

Результати досліджень. При забрудненні ґрунтів сировою нафтою, у складі якої міститься значна кількість домішок, до схеми рекультивзації включаються хімічні меліоранти. На початковому етапі проводиться, якщо це можливо, відмивання від солей, потім гіпсування, далі виконуються передбачені в системі заходи: агротехнічні та біологічні способи рекультивзації ґрунтів [11]. Існують два шляхи інтенсифікації біодеградації ксенобіотиків у навколишньому середовищі – стимуляція природної мікрофлори та інтродукція активних штамів, не тільки не суперечать, а й доповнюють один одного. Моніторинг нафтопроводів за допомогою безпілотних літальних апаратів дозволяє ефективно контролювати стан інфраструктури, проаналізувати зміни та запланувати необхідні заходи. Використовуючи відеокамеру і тепловізор, які встановлюються на безпілотник, можна отримувати всю необхідну інформацію в режимі реального часу [12].

Хімічний статус визначається за вмістом пріоритетних забруднювальних речовин. Всього до переліку пріоритетних речовин на даний час віднесено 45 забруднювальних речовин (важкі метали (кадмій, свинець, нікель, ртуть) та органічні речовини): 33 – за Директивою 2008/105/ЄС про екологічні стандарти у сфері водної політики та 15 – за Директивою 2013/39/ЄС, яка вносить зміни до ВРД та Директиви 2008/105/ЄС про пріоритетні речовини (табл. 1). Вони встановлені в таких Директивах: Директива щодо скидів ртуті (82/176/ЄЕС);

Директива щодо скидів кадмію (83/513/ЄЕС); Директива щодо ртуті (84/156/ЄЕС); Директива щодо скидів гексахлороциклогексану (84/491/ЄЕС); та Директива щодо скидів небезпечних речовин (86/280/ЄЕС) [13].

Тоді, з урахуванням максимальної недіючої концентрації [15] нами пропонується визначати ступінь ризику шкідливого впливу забруднювальних хімічних речовин через відповідні показники (1) або рівні захворюваності за певними нозологічними групами, зміни максимальних недіючих концентрацій та кількість населення, яка постійно піддається шкідливому впливу (2)

$$\lambda = \frac{1}{\lg \text{МНК}} \frac{1}{e^{\Delta C \beta}}; \quad (1)$$

$$\gamma = \frac{T}{t_{50} T_1 \lg \text{МНК}} \frac{\chi}{(1 - \chi) e^{\Delta C \beta}}; \quad (2)$$

де T – кількість населення, яке зазнало впливу речовини; T_1 – кількість населення, що мешкає на території, яка досліджується; t_{50} – час, за який можуть з'явитись перші ознаки захворювання; $\lg \text{МНК}$ – логарифм максимальної недіючої концентрації впливу в компонентах довкілля; χ – рівень захворюваності за відповідною нозологічною групою за рік; ΔC – зміни рівня концентрацій окремих речовин; β – частка зазначених хімічних речовин у загальному об'ємі забруднення.

Запропоновані математичні моделі були апробовані на прогнозування ризику промислового забруднення ґрунтів з визначенням концентрацій шкідливих хімічних речовин [16], що дозволило в деяких випадках отримати відповідні прогнозні моделі змін концентрацій (табл. 2).

В Україні у лабораторних умовах аналізи проб здійснюються різними методами. Для визначення елементної сірки проби ґрунту розкладають в кислотному середовищі, після чого вимірюється вміст сірки за допомогою інфрачервоного спектрометра. Для визначення фтору проби екстрагують водою та аналізують з використанням іоніміру для визначення заряду фторид-іонів. Метали (мідь, хром, марганець, ртуть, свинець, цинк, кобальт, кадмій, нікель, миш'як) виявляють методом атомно-абсорбційної спектроскопії (ААС). Проби ґрунту піддають кислотному розкладанню з використанням суміші азотної та соляної кислот, потім фільтрують і аналізують на вміст металів за допомогою ААС-спектрометра. Окремі проби ґрунту екстрагують органічним розчинником (гексаном), потім екстракт концентрують і аналізують за допомогою газового хроматографа на вміст ксилілів (орто-, мета-, пара-). Бенз(а)пірен визначають екстракцією з проб ґрунту органічним розчинником, де екстракт концентрують і аналізують. Формальдегід екстрагують водою і визначають колориметричним методом з використанням спектрофотометра при довжині хвилі 410 нм.

Для вивчення механізму очищення гірських ґрунтів від нафтопродуктів у лабораторних умовах зразки ґрунту, спеціально змішують з бензином та дизельним паливом у кількості 50 г/кг. В більшості досліджень використовувалося бензинове автотранспортне паливо А-92. В Європі основна формула для визначення ступеня деструкції вуглеводнів, розраховується на основі зміни концентрації вуглеводнів у ґрунті до та після

Таблиця 1

Пріоритетні речовини [13-14]

	CAS номер (¹)	EU номер (²)	Назви пріоритетних речовин	Ідентифіковані як пріоритетні небезпечні речовини
(1)	15972-60-8	240-110-8	Алахлориди	
(2)	120-12-7	204-371-1	Антрацени	(x)*
(3)	1912-24-9	217-617-8	Антразини	(x)*
(4)	71-43-2	200-753-7	Бензоли	
(5)	відсутній	відсутній	Бромовані дифенілетари (**)	X****
(6)	7440-43-9	231-152-8	Кадмій та його сполуки	X
(7)	85535-84-8	287-476-5	C ₁₀₋₁₃ – хлор алкани**	X
(8)	470-90-6	207-432-0	Хлорофенвінфос	
(9)	2921-88-2	220-864-4	Хлорпіріфоси	(x)*
(10)	107-06-02	203-458-1	1,2-Дихлоретани	
(11)	75-09-2	200-838-9	Дихлорметани	
(12)	117-81-7	204-211-0	Ди(2-етилгідроксил)фталати	(x)*
(13)	330-54-1	206-354-4	Діурони	(x)*
(14)	115-29-7	204-079-4	Ендосульфани	(x)*
(15)	206-44-0	205-912-4	Флуорантрен (****)	
(16)	118-74-1	204-273-9	Гексахлорбензоли	X
(17)	87-68-3	201-765-5	Гексахлорбутадієни	X
(18)	608-73-1	210-158-9	Гексахлорциклогексани	X
(19)	34123-59-6	251-835-4	Ізопротурони	(x)*
(20)	7439-92-1	231-100-4	Свинець і його сполуки	(x)*
(21)	7439-97-6	231-106-7	Ртуть і її сполуки	X
(22)	91-20-3	202-049-5	Нафталіни	(x)*
(23)	7440-02-0	231-111-4	Нікель та його сполуки	
(24)	25154-52-3	246-672-0	Ноніфеноли	X
(25)	1806-26-4	217-302-0	Октилфеноли	(x)*
(26)	608-93-5	210-172-5	Пентахлорбензоли	X
(27)	87-86-5	201-778-6	Пентахлорфеноли	(x)*
(28)	відсутній	відсутній	Поліароматичні вуглеводні	X
	50-32-8	200-028-5	(Безо(а)пірени)	
	205-99-2	205-911-9	(Бензо(б)флуорантен	
	191-24-2	205-883-8	(Бензо(g,h,i)перилен	
	207-08-9	205-916-6	(Бензо(k)флуорантен)	
	193-39-5	205-893-2	(Індено(1,2,3-cd)пірен)	
(29)	122-34-9	204-535-2	Симазин	(x)*
(30)	688-73-3	211-704-4	Трибутилолові сполуки	X
	36643-28-4	відсутній	(Трибутилоловий-катіон)	
(31)	12002-48-1	234-413-4	Трихлорбензоли	(x)*
	120-82-1	204-428-0	(1,2,4-Трихлорбензол)	
(32)	67-66-3	200-663-8	Трихлорометан (хлороформ)	
(33)	1582-09-8	216-428-8	Трифлуралін	(x)*

(*) Для певних груп речовин до переліку включено їхніх типових індивідуальних представників як індикативні параметри.

(**) Ці групи речовин звичайно включають значну кількість індивідуальних сполук. Сьогодні відповідні індикативні параметри не можуть бути надані.

(***) Ця пріоритетна речовина підлягає перегляду для її ідентифікації як можливої «пріоритетної небезпечної речовини». Термін, встановлений у Статті 16 Директиви 2000/60/ЕС для пропозицій Комісії щодо регулювання, від цього перегляду не зміниться.

(****) Лише пентабромобіфенілетер (CAS-номер 32534-81-9).

(*****) Флуорантен включено до переліку в ролі індикатора інших, більш шкідливих, поліароматичних вуглеводнів.

1 CAS: Chemical Abstract Services – Хімічна реферативна служба.

2 EU – номер в EINECS (European Inventory of Existing Commercial Chemical Substances – Європейський реєстр існуючих торгових хімічних речовин) або в ELINCS (European List of Notified Chemical Substances – Європейський перелік зареєстрованих хімічних речовин).

Таблиця 2

Ризик промислового забруднення, прогнозовані математичні залежності змін концентрацій у ґрунтах [16]

Речовина	Математична залежність
Нафтопродукти	$y = -0,2468x^4 + 3,4372x^3 - 17,318x^2 + 37,348x - 29,2; R^2 = 1$
Іони міді (II)	$y = -0,0042x^4 + 0,0585x^3 - 0,2943x^2 + 0,642x - 0,572; R^2 = 1$
Розчинний амоній (NH_4^+)	$y = -0,0364x^4 + 0,5326x^3 - 2,8426x^2 + 6,4284x - 4,865; R^2 = 1$
Фосфати (PO_4^{3-})	$y = -0,0575x^3 + 0,6009x^2 - 2,1256x + 2,866; R^2 = 0,9793$
Загальне залізо (III)	$y = -67,875x^4 + 543895x^3 - 2E+09x^2 + 2E+12x - 1E+15; R^2 = 1$
Нітриди (NO_2^-)	$y = 11,258x^4 - 90216x^3 + 3E+08x^2 - 4E+11x + 2E+14; R^2 = 1$
Нітрати (NO_3^-)	$y = -1,9586x^4 + 15692x^3 - 5E+07x^2 + 6E+10x - 3E+13; R^2 = 1$
Феноли	$y = 8E+11x^4 + 5E+09x^3 - 2E+08x^2 + 954316x - 1448,4; R^2 = 0,9882$
о-, м-, п-толуоли	$y = 0,0039\ln(x) + 0,0129; R^2 = 0,9862$
Сірководень	$y = 4E+11x^{5,4768}; R^2 = 0,9998$
Оцтова кислота	$y = 7E+13x^{5,6142}; R^2 = 0,9982$
Іони марганцю (II)	$y = -0,0001x^4 + 0,0053x^3 - 0,0749x^2 + 0,2766x + 9,1603; R^2 = 1$
Аліфатичні спирти	$y = -6E-06x^5 + 0,0003x^4 - 0,0057x^3 + 0,0473x^2 - 0,1578x + 0,4671; R^2 = 1$
Амінокислоти	$y = -6E-06x^6 + 0,0005x^5 - 0,0156x^4 + 0,2311x^3 - 1,656x^2 + 5,1919x + 2,5613; R^2 = 0,9972$
Ароматичні сульфокислоти (СПАР)	$y = 9E-06x^6 - 0,0006x^5 + 0,0159x^4 - 0,2016x^3 + 1,2727x^2 - 3,5623x + 4,2467; R^2 = 0,9892$

Таблиця 3

Хімічні показники ґрунту та гранично допустима концентрація (ГДК) хімічних речовин у ґрунті

№	Назва речовини	Середня концентрація в Україні	Середня Концентрація в світі	Застосування
1	Сірка	180	173	Високі концентрації сірки можуть призвести до закислення [18]
2	Фтор	4.6	3.5	Фтор може викликати флюороз у тварин та рослин, порушуючи їх нормальний розвиток
3	Хром	6.9	7.3	Хром VI може проникати в рослини, викликаючи мутаційні зміни [19]
4	Марганець	1580	1590	Марганець у високих концентраціях може бути токсичним для рослин, викликаючи хлороз та некроз листя [20]
5	Ртуть	2.5	2.4	Ртуть може накопичуватися в харчових ланцюгах, викликаючи тяжкі отруєння [21]
6	Свинець	35	36	Свинець може викликати когнітивні порушення та затримку розвитку [22]
7	Бенз(а)пірен	0.1	0.05	Потужний канцероген, що викликає пухлини при тривалому впливі [23]
8	Миш'як	2	3	Миш'як може накопичуватися в організмі, викликаючи хронічні захворювання та рак

обробки методом газової хроматографії. Розрахунок здійснюється за такою формулою:

$$n = \left(\frac{C_n - C_k}{C_n} \right) \times 100 \quad (3)$$

де n – Ступінь деструкції, %; C_n – початкова концентрація; C_k – кінцева концентрація.

Для екологічної оцінки ґрунту, очищеного від нафтопродуктів, авторами [17] було проведено біотестування з використанням крес-салату (*Lepidium sativum*). Робота проводилася з використанням теоретичних, аналітичних та лабораторно-дослідницьких методів. У процесі дослідницької роботи було проведено хімічні аналізи родючого чорнозему та чистої гірської землі без нафтопродуктів та забрудненої ними. Були використано

гравіметричний метод для визначення вмісту загального вуглецю та вуглеводню у ґрунті. Цей метод дозволяє точно виміряти масу залишку після випаровування та прожарювання, що важливо з метою оцінки вуглеводневого забруднення.

Нами проаналізовано середні показники по допустимих концентраціях шкідливих речовин в ґрунті в Україні та світі (табл. 3). Аналіз таблиці показує, що до ґрунтів України ефективним є застосування методів очищення, таких як біоремедіація з використанням біопрепаратів. Ці дані підкреслюють необхідність подальших досліджень моніторингу стану ґрунту для забезпечення екологічної безпеки. Проаналізовані в статті джерела надають велику інформацію про хімічні речовини, їх вплив на довкілля та здоров'я

людини, а також методи дослідження та контролю за їх концентраціями у ґрунтах.

Висновки. Очистка нафтозабруднених земель за допомогою внесення мікроорганізмів, відома як біоремедіація, дійсно є доведено доцільним та ефективним способом, який може допомогти відновити після воєнних ґрунти на території України. А мікроорганізми, які можуть розкладати вуглеводні, впроваджувати в забрудненні ділянки, де вони б починали процес біоремедіації, руйнуючи нафтопродукти до менш шкідливих речовин. Переваги цих методів полягає в використанні природних мікроорганізмів та мінімізує ризики для навколишнього середовища порівняно з хімічними методами очищення. Біоремедіація може бути особливо ефективною у випадках, коли інші методи не дають результатів. У деяких випадках біоремедіація може бути більш економічно вигідно, ніж фізичні або хімічні методи. Іноді біоремедіація є єдиною можливим варіантом, особливо у випадках з важкими металами та тривалими забрудненнями, де інші методи очищення не підходять через свою неефективність або високий ризик для навколишнього середовища.

СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ:

- Smith J., Brown R., Green D. Environmental impacts of tourism on soil pollution: A case study of automotive emissions in tourist regions. *Environmental Science and Pollution Research*. 2017. Vol. 24(18). P. 15502-15515.
- UNEP Environmental Impact of Transport on Soil Pollution in Unique Natural Areas. *United Nations Environment Programme*. 2020.
- Brown J. Smith R. Soil Pollution from Transport Accidents. *Journal of Environmental Protection*. 2015. Vol. 10(5). P. 200–210.
- Zhanar Kassenova, Yeldos Iskakov, Bolat Yermagambet, Bauyrzhan Kapsalyamov, Mezgil Saulebekova, Dina Imbayeva, Maira Kazankapova¹ and Dariga Nasyrova. Effectiveness of Oil-Contaminated Soil Reclamation with Humic Preparations. *International Journal of Agriculture and Biosciences*. 2024. Vol. 13(3). P. 474–487. <https://doi.org/10.47278/journal.ijab/2024.154>.
- Kapsalyamov B., Tuyak S., Kassenova Zh., Yermagambet B., Kazankapova M. *Innovative ways to clean oil contaminated soil. XIII international scientific conference*. Tallinn. Estonia. 23-24.05.2024. P. 85-92.
- Onerkhan G., Durmekbaeva Sh., Akhmetova N. Bioindication of water quality of Lake Zeran using micro seaweed. *Polish journal of science*. 2019. № 19, Vol. 1. P. 7 11.
- Өнеркхан Г., Скіпін Л., Бадельгазхі Е., Жұмай Е., Сыздықов Е. Мұнай өнімдерімен ластанған топырақты биореми диатсиялау. *KazUTB*. 2023. Vol. 4. No. 21. (In. Kaz.)
- Wang X. Bioassays for assessing phytotoxicity in contaminated soils. *Environmental Pollution*. 2014. Vol. 189. P. 208–214.
- Xu X., Zhou Z. The impacts of tourism on soil properties and the environment in Mediterranean areas. *Geosciences*. 2020. Vol. 10(6). P. 221.
- Leung E., Yang A. Sustainability in tourism practices and its impact on soil conservation. *International Journal of Tourism Research*. 2021. Vol. 23(4). P. 845–859.
- Mench M. Successes and limitations of phytotechnologies at field scale: outcomes, assessment and outlook from COST Action 859. *Journal of Soils and Sediments*. 2010. № 10. P. 1039–1070.
- Vasilyeva G., Kondrashina V., Strijakova E., Ortega-Calvo J-J. Adsorptive bioremediation of soil highly contaminated with crude oil. *Sci. Total Environ*. 2020. 706, No135739. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2019.135739>
- WFD CIS Guidance Document No. 2. Identification of Water Bodies. Published by the Directorate General Environment of the European Commission, Brussels. 2003. ISBN No. 92-894-5122-X, ISSN No. 1725-1087.
- WFD CIS Guidance Document No. 9. Implementing the Geographical Information System Elements (GIS) of the Water Framework Directive. Published by the Directorate General Environment of the European Commission, Brussels. 2002. ISBN No. 92- 94-5129-7, ISSN No. 1725-1087.
- Строкаль В. П., Шевчук С. А. Затоплення та підтоплення територій : ризики для водної та продовольчої безпеки регіонального рівня. *Екологічні науки*. 2023. № 4(49). С. 159-170. <https://doi.org/10.32846/2306-9716/2023.eco.4-49.21>.
- Strokal V., Kurovska A., Strokal M. More river pollution from untreated urban waste due to the Russian-Ukrainian war: a perspective view. *Journal of Integrative Environmental Sciences*. 2023. Vol. 20, No. 1. P. 1-11. <https://doi.org/10.1080/1943815X.2023.2281920>.
- Cheng F., Liu J. Soil pollution in ecologically sensitive regions: The role of tourism in soil contamination. *Environmental Geochemistry and Health*. 2022. Vol. 44(2).
- Alloway B. J. Sources of heavy metals and metalloids in soils. Heavy metals in soils: trace metals and metalloids in soils and their bioavailability. 2013. P. 11-50.
- UNEP World Tourism Organization's Report on Tourism and Sustainability. United Nations Environment Programme. 2017.
- Cummings C., Lee H. Impact of tourism on soil degradation. *Journal of Environmental Science*. 2021. Vol. 59(4). P. 351–358.
- Zhang X., Lin Z. Evaluation of tourist-induced soil pollution in coastal zones. *Marine Pollution Bulletin*. 2016. Vol. 113(1–2). P. 356–362.
- Liang H., Wang Y. Climate change and tourism: Addressing the environmental costs of tourism activities. *Tourism Management Perspectives*. 2020. Vol. 34. P. 100668.
- Zhang S., Wang Z. Bioaccumulation of pollutants in soil: The effects of tourism on soil health. *Soil Science and Plant Nutrition*. 2021. Vol. 67(4). P. 253–262.

REFERENCES:

- Smith, J., Brown, R., & Green, D. (2017). Environmental impacts of tourism on soil pollution: A case study of automotive emissions in tourist regions. *Environmental Science and Pollution Research*, 24(18), 15502–15515.
- United Nations Environment Programme. (2020). *Environmental impact of transport on soil pollution in unique natural areas*.
- Brown, J., & Smith, R. (2015). Soil pollution from transport accidents. *Journal of Environmental Protection*, 10(5), 200–210.

4. Kassenova, Z., Iskakov, Y., Yermagambet, B., Kapsalyamov, B., Saulebekova, M., Imbayeva, D., Kazankapova, M., & Nasyrova, D. (2024). Effectiveness of oil-contaminated soil reclamation with humic preparations. *International Journal of Agriculture and Biosciences*, 13(3), 474–487. <https://doi.org/10.47278/journal.ijab/2024.154>
5. Kapsalyamov, B., Tuyak, S., Kassenova, Z., Yermagambet, B., & Kazankapova, M. (2024). Innovative ways to clean oil contaminated soil. In *XIII International Scientific Conference*, Tallinn, Estonia, pp. 85–92.
6. Onerkhan, G., Durmekbaeva, Sh., & Akhmetova, N. (2019). Bioindication of water quality of Lake Zeran using micro seaweed. *Polish Journal of Science*, 19(1), 7–11.
7. Önerkhan, G., Skipin, L., Badelgazhy, E., Zhumay, E., & Syzdykov, E. (2023). Мұнай өнімдерімен ластанған топырақты биоремидациялау [Bioremediation of soil contaminated with oil products]. *KazUTB*, 4(21). (In Kazakh)
8. Wang, X. (2014). Bioassays for assessing phytotoxicity in contaminated soils. *Environmental Pollution*, 189, 208–214.
9. Xu, X., & Zhou, Z. (2020). The impacts of tourism on soil properties and the environment in Mediterranean areas. *Geosciences*, 10(6), 221.
10. Leung, E., & Yang, A. (2021). Sustainability in tourism practices and its impact on soil conservation. *International Journal of Tourism Research*, 23(4), 845–859.
11. Mench, M. (2010). Successes and limitations of phytotechnologies at field scale: Outcomes, assessment and outlook from COST Action 859. *Journal of Soils and Sediments*, 10, 1039–1070.
12. Vasilyeva, G., Kondrashina, V., Strijakova, E., & Ortega-Calvo, J.-J. (2020). Adsorptive bioremediation of soil highly contaminated with crude oil. *Science of the Total Environment*, 706, 135739. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2019.135739>
13. Directorate General Environment of the European Commission. (2003). WFD CIS Guidance Document No. 2: Identification of water bodies. *Brussels*. ISBN 92-894-5122-X.
14. Directorate General Environment of the European Commission. (2002). WFD CIS Guidance Document No. 9: Implementing the geographical information system elements (GIS) of the Water Framework Directive. *Brussels*. ISBN 92-94-5129-7.
15. Stokral, V. P., & Shevchuk, S. A. (2023). Zatoplenня ta pidtoplenня terytoriy: ryzyky dlya vodnoyi ta prodovol'choyi bezpeky rehional'noho rivnya [Flooding and sub-flooding of territories: risks for water and food security at the regional level]. *Ecological Sciences – Ekologichni nauky*, 4(49), 159–170. <https://doi.org/10.32846/2306-9716/2023.eco.4-49.21> [in Ukrainian].
16. Stokral, V., Kurovska, A., & Stokral, M. (2023). More river pollution from untreated urban waste due to the Russian-Ukrainian war: A perspective view. *Journal of Integrative Environmental Sciences*, 20(1), 1–11. <https://doi.org/10.1080/1943815X.2023.2281920>
17. Cheng, F., & Liu, J. (2022). Soil pollution in ecologically sensitive regions: The role of tourism in soil contamination. *Environmental Geochemistry and Health*, 44(2).
18. Alloway, B. J. (2013). Sources of heavy metals and metalloids in soils. In *Heavy metals in soils: Trace metals and metalloids in soils and their bioavailability*, (pp. 11–50).
19. United Nations Environment Programme. (2017). *World Tourism Organization's report on tourism and sustainability*.
20. Cummings, C., & Lee, H. (2021). Impact of tourism on soil degradation. *Journal of Environmental Science*, 59(4), 351–358.
21. Zhang, X., & Lin, Z. (2016). Evaluation of tourist-induced soil pollution in coastal zones. *Marine Pollution Bulletin*, 113(1–2), 356–362.
22. Liang, H., & Wang, Y. (2020). Climate change and tourism: Addressing the environmental costs of tourism activities. *Tourism Management Perspectives*, 34, 100668.
23. Zhang, S., & Wang, Z. (2021). Bioaccumulation of pollutants in soil: The effects of tourism on soil health. *Soil Science and Plant Nutrition*, 67(4), 253–262.

Башлай С.В., Свистунова Н.Л. Біоре mediaція забруднених земель: сучасні українські технології та світові підходи

Мета статті – проаналізувати ризики від забруднення промисловими стоками земельних ресурсів України, та проаналізувати світові підходи.

Для здійснення дослідження було використано такі методи: систематизація матеріалу, наукове узагальнення, порівняння. Вони дозволили виявити та усвідомити просторову диференціацію та різноманітність факторів, що надають вплив на стан земельних ресурсів у різних природних та соціально-економічних умовах; систематизувати та узагальнити ризики, що виникають під час використання біоре mediaції. В статті проаналізовано різні методи хімічного аналізу ґрунтів для визначення вмісту органічних поллютантів та їх метаболітів у ґрунті, зокрема методи ГРХ, хроматомас-спектрометрії.

Результати досліджень. В статті проаналізовано середні показники по допустимих концентраціях шкідливих речовин в ґрунті в Україні та світі. Аналіз показує, що до ґрунтів України ефективним є застосування методів очищення, таких як біоре mediaція з використанням біопрепаратів. Отримані дані підкреслюють необхідність подальших досліджень моніторингу стану ґрунту для забезпечення екологічної безпеки. Проаналізовані в статті джерела надають велику інформацію про хімічні речовини, їх вплив на забруднення земель, а також методи дослідження та контролю за їх концентраціями у ґрунтах.

Огляд останніх літературних джерел показав ефективність біопрепарату «Бакойл-KZ» для біологічної рекультивації нафтозабруднених ґрунтів. Основними активними компонентами цього препарату є специфічні штами мікроорганізмів, такі як *Acinetobacter calcoaceticus*, *Microbacterium lacticum*, та *Arthrobacter terregens*. Ці мікроорганізми володіють високою нафто-окислювальною активністю, що дозволяє їм ефективно розкласти вуглеводні, присутні у нафтопродуктах.

Ключові слова: рекультивация ґрунтів, мікроорганізми, біопрепарати, екологічний моніторинг, способи відновлення забруднених земель.

Bashlai S.V., Svystunova N.L. Bioremediation of contaminated lands: modern Ukrainian technologies and global approaches

The purpose of the article is to analyze the risks of industrial runoff pollution of land resources of Ukraine, and to analyze global approaches.

The following methods were used to conduct the study: systematization of the material, scientific generalization, comparison. They allowed to identify and understand the spatial differentiation and diversity of factors that influence the state of land resources in different natural and socio-economic conditions; to systematize and generalize the risks that arise during the use of bioremediation. The article analyzes various methods of chemical analysis of soils to determine the content of organic pollutants and their metabolites in the soil, in particular, methods of GC, chromatography-mass spectrometry.

Research results. The article analyzes the average indicators of permissible concentrations of harmful substances in the soil in Ukraine and the world. The analysis shows that the application of cleaning methods, such as bioremediation using biological preparations, is effective for Ukrainian soils. The data obtained emphasize the need

for further research into monitoring the state of the soil to ensure environmental safety. The sources analyzed in the article provide extensive information about chemicals, their impact on land pollution, as well as methods for studying and monitoring their concentrations in soils.

A review of recent literature has shown the effectiveness of the biological preparation «Bakoyl-KZ» for the biological remediation of oil-contaminated soils. The main active components of this preparation are specific strains of microorganisms, such as *Acinetobacter calcoaceticus*, *Microbacterium lacticum*, and *Arthrobacter terregens*. These microorganisms have high oil-oxidizing activity, which allows them to effectively decompose hydrocarbons present in petroleum products.

Key words: soil remediation, microorganisms, biological products, environmental monitoring, methods of restoring contaminated lands.

Дата першого надходження рукопису до видання: 22.09.2025

Дата прийнятого до друку рукопису після рецензування: 27.10.2025

Дата публікації: 28.11.2025