

УДК 504.054:614.876

DOI <https://doi.org/10.32782/2226-0099.2026.149.1.39>

АНАЛІЗ СВІТОВОГО ДОСВІДУ РЕМЕДІАЦІЇ РАДІОАКТИВНО ЗАБРУДНЕНИХ ҐРУНТІВ

Забарний О.С. – к.с.-г.н.,

ст. науковий співробітник лабораторії радіології аграрних і лісових екосистем
відділу радіоекології і дистанційного зондування ландшафтів,

Інститут агроекології і природокористування

Національної академії аграрних наук України

orcid.org/0009-0007-3337-9386

Забарна Т.А. – к.с.-г.н.,

ст. викладач кафедри землеробства, ґрунтознавства та агрохімії,

Вінницький національний аграрний університет

orcid.org/0000-0002-6796-7625

Пелех Л.В. – к.с.-г.н.,

ст. викладач кафедри землеробства, ґрунтознавства та агрохімії,

Вінницький національний аграрний університет

orcid.org/0000-0003-0967-2121

В Україні, внаслідок аварії на Чорнобильській АЕС, значна частина земельних ресурсів є радіаційно забрудненими і не можуть бути використані у сільськогосподарському виробництві. Крім того, тривалі воєнні дії можуть сприяти подальшому розповсюдженню радіонуклідів у воду та повітря. Тому важливою проблемою сьогодення є розробка методичних засад моніторингу та контролю за такими землями, а також удосконалення системи ремедіації забруднених територій.

Існує багато методів ремедіації радіоактивних ґрунтів. Хімічні або фізико-хімічні методи вимагають врахування багатьох факторів, таких як температура та вологість ґрунту, рН середовища, вибір ефективного реагенту тощо. З цієї причини такі методи ремедіації не завжди є ефективними або економічно доцільними.

Біологічні методи ремедіації ґрунту є більш економічно вигідними, не потребують втручання в структуру ґрунту, запобігаючи вторинному забрудненню, однак мають сповільнену ефективність та залежність від кліматичних умов. Значного поширення у біоремедіації набуло використання таких мікроорганізмів як *Bacillus sp.*, *Lysinibacillus sp.*, *Rhodococcus sp.*, *Ascomycota*, *Basidiomycota*, *Perenniporia subtephropora*, *Daldinia starbaeckii*, *Phanerochaete conrescens*.

Вчені всього світу проводять безліч дослідів по визначенню кращих місцевих видів рослин, що найбільш ефективно сприяють зниженню вмісту радіоактивних елементів у ґрунті. Відомо, що такі культури як злакові трави, буркун білий, соняшник, гірчиця біла, турнепс, гірчиця салатна та ріпак мають здатність накопичувати радіонукліди та трансформувати сполуки важких металів у зв'язану форму.

Останнім часом, визначну роль у фіторемедіації відіграють ярий і озимий ріпак. Використання ріпаку сприяє фіксації і вилученню радіонуклідів, зниженню їх мобільності у ґрунтовому профілі, стимуляції ґрунтової мікробіоти, активізації біогеохімічних циклів, отриманню технічної олії навіть на забруднених землях, виробництву біопалива, зменшенню ерозії, збільшенню органічної речовини після повернення рослинних решток у ґрунт.

Ключові слова: екологія, радіонукліди, важкі метали, ремедіація, ґрунти, бактерії, агроценози, ріпак озимий.



© Забарний О.С., Забарна Т.А., Пелех Л.В., 2026

Стаття поширюється на умовах ліцензії CC BY 4.0

Zabarnyi O.S., Zabarna T.A., Pelekh L.V. Analysis of international experience in the remediation of radioactively contaminated soils

In Ukraine, as a result of the accident at the Chernobyl Nuclear Power Plant, a significant proportion of land resources are contaminated with radiation and cannot be used for agricultural production. Furthermore, prolonged military operations may contribute to the further spread of radionuclides into water and air. Therefore, a key current challenge is the development of methodological principles for monitoring and controlling such land, as well as improving the system for remediating contaminated areas.

There are many methods for the remediation of radioactive soils. Chemical or physico-chemical methods require consideration of many factors, such as soil temperature and moisture content, the pH of the environment, the selection of an effective reagent, and so on. For this reason, such remediation methods are not always effective or economically viable.

Biological methods of soil remediation are more cost-effective, do not require interference with the soil structure, and prevent secondary contamination; however, they are slow-acting and dependent on climatic conditions. The use of microorganisms such as Bacillus sp., Lysinibacillus sp., Rhodococcus sp., Ascomycota, Basidiomycota, Perenniporia subtephropora, Daldinia starbaeckii and Phanerochaete concrescens has become widespread in bioremediation.

Scientists around the world are conducting numerous experiments to identify the best local plant species that most effectively contribute to reducing the content of radioactive elements in the soil. It is known that crops such as grasses, white sweet clover, sunflower, white mustard, turnip, salad mustard and rapeseed have the ability to accumulate radionuclides and transform heavy metal compounds into a bound form.

Recently, spring and winter rapeseed have played a significant role in phytoremediation. The use of rapeseed contributes to the fixation and removal of radionuclides, a reduction in their mobility within the soil profile, stimulation of the soil microbiota, activation of biogeochemical cycles, the production of industrial oil even on contaminated land, the production of biofuel, a reduction in erosion, and increasing organic matter following the return of plant residues to the soil.

Key words: ecology, radionuclides, heavy metals, remediation, soils, bacteria, agrocenoses, winter rapeseed.

Постановка проблеми. Тривалі військові дії в Україні несуть загрозу повторного радіаційного забруднення водних ресурсів та ґрунтів, що у свою чергу може загрожувати продовольчій безпеці та здоров'ю населення. Тому існує необхідність ремедіації ґрунтів радіоактивно забруднених територій, з метою повернення їм функціональності, родючості та безпеки в умовах кризових викликів.

Науковці вважають, що розробка інтегрованих моделей агровиробництва, які оптимально поєднуюватимуть екологічну безпеку з економічною ефективністю є перспективним напрямом досліджень. При цьому, особливу увагу необхідно приділити адаптації сільськогосподарських практик до змін клімату, а також вдосконаленню методів моніторингу стану ґрунтів і рослин на забруднених територіях [1].

Відмічено, що запровадження систем точного землеробства у поєднанні з ГІС-технологіями надає можливість здійснювати ретельний моніторинг стану ґрунтів та оптимізувати використання ресурсів. Застосування методів фіторемердіації та біологічних препаратів для відновлення родючості ґрунтів особливо актуально для територій, постраждалих унаслідок бойових дій [2].

Мета роботи полягає в аналізі практичного досвіду та наукових підходів у ремедіації радіоактивно забруднених ґрунтів та повернення таких земель у сівозміну.

Матеріали та методи досліджень. Дослідження передбачає використання комплексу наукових методів, спрямованих на узагальнення результатів застосування заходів для відновлення радіоактивно забруднених ґрунтів. Здійснено пошук наукових джерел у національних і міжнародних базах. Проведено їх аналіз для виявлення основних тенденцій і отриманих результатів. Застосовано методи

систематизації, узагальнення та порівняльного аналізу для формування висновків, що дало змогу критично оцінити результати сучасних наукових досліджень та визначити перспективи у цьому напрямку.

Результати та обговорення. Як відомо, в Україні понад 3,5 мільйона гектарів лісових угідь радіоактивно забруднені внаслідок аварійних викидів Чорнобильської атомної електростанції. Однак вплив Чорнобильської аварії не обмежується лише зоною відчуження. У різних регіонах України та на природоохоронних територіях були проведені дослідження з метою встановлення процесів міграції радіонуклідів і важких металів та можливих взаємозв'язків між ними [3].

Ґрунт – це складна система і практично невідновлюваний природний ресурс. Важкі метали дуже повільно розкладаються біологічним способом і тому накопичуються у навколишньому середовищі. Як правило, важкі метали у ґрунті мають токсикологічний вплив на ґрунтові мікроорганізми, що призводить до зниження їх чисельності та активності [4, 5].

Важкі метали, що проникають у живі клітини, проявляють свою токсичну дію переважно у формі іонів. Однак, якщо важкі метали та радіонукліди перетворюються у зв'язані форми різними способами, вони втрачають свої токсичні властивості [6].

Забруднення ґрунтів радіонуклідами та важкими металами може бути як природним, так і антропогенним. Крім того, різні важкі метали мають певну швидкість накопичення та біодоступність, що базується на фізичних та хімічних властивостях ґрунтів. У зв'язку з цим важливо визначити основні джерела, долю та особливості розподілу важких металів та радіонуклідів у ґрунтах [7].

Вчені зазначають, що внесення в ґрунт широкого спектру біологічних добрив, таких як гній від худоби, компости та осади стічних вод, ненавмисно призводить до накопичення важких металів, таких як As, Cd, Cr, Cu, Pb, Hg, Ni, Se, Mo, Zn, Tl, Sb, тощо [8, 9].

Тривалий період напіврозпаду радіонуклідів сприяє довготерміновій присутності їх у навколишньому середовищі, що в свою чергу призводить до різних ускладнень зі здоров'ям людей, таких як рак [10].

Науковці встановили, що за ефективністю сорбції радіоактивних ізотопів ґрунти розташовані в такому порядку: дерново-підзолисті ґрунти, сірі ґрунти, жовтоземи, червоноземи, каштанові ґрунти та чорноземи. Існують відомості про значне перенесення радіоактивного цезію до рослин у піщаних та супіщаних ґрунтах з низьким вмістом глинистих мінералів та органічної речовини. У межах однієї групи ґрунтів характер поглинання ^{137}Cs рослинами може змінюватися залежно від поглинальної здатності ґрунту, вмісту макро- та мікроелементів, а також рН ґрунтового розчину [11].

Вплив дрібних фракцій ґрунту пов'язаний з міцнішою фіксацією у них радіонуклідів, що зумовлено більшою питомою поверхнею частинок глини та мулу та зміною хімічних властивостей ґрунту: збільшується вміст обмінних катіонів та органічної речовини, а також поглинальна здатність [12]. Таким чином, вплив властивостей ґрунту на транслокацію радіонуклідів можна описати наступним визначенням: перенесення радіонуклідів до рослин збільшується зі зменшенням вмісту глини, мулу, органічної речовини та поглинальної здатності в ґрунті [13].

Дослідження проведені на суглинкових ґрунтах показали, що застосування майже усіх видів добрив збільшувало урожайність рослин та знижувало вміст радіоактивних речовин у продукції. На погано мінералізованих та гідроморфних

грунтах поглинання деяких радіоактивних речовин іноді могло збільшуватися при застосуванні мінеральних добрив [14].

Відновлення радіоактивно забруднених ґрунтів здійснюється за допомогою методів, заснованих на таких стратегіях, як сухе розділення, промивання ґрунту, флотаційне розділення, термічна десорбція, електрокінетична ремедіація, фіто-ремедіація тощо. Основними факторами, що допомагають ефективно підбирати методи очищення ґрунту є його тип, розмір частинок, відсоток дрібних частинок та характеристики радіонуклідів [15].

Хімічну або фізико-хімічну ремедіацію можна використовувати як самостійний метод (коли концентрації важких металів менше 100 мг/кг), але доцільніше використовувати її як попередній крок перед біологічною ремедіацією [16].

При використанні фізико-хімічних методів слід враховувати багато факторів, наприклад, рН, температуру, час, природу десорбуючого агента тощо. Це в свою чергу робить фізико-хімічний метод не завжди придатним, ефективним або економічно доцільним [17].

Хімічні та фізико-хімічні методи при окремому застосуванні вимагають обробки ґрунту певними реагентами та подальшого вилуговування органічним або неорганічним розчинником, що може призвести до погіршення властивостей ґрунту, створюючи додатковий фактор руйнування природних властивостей ґрунту, виключаючи можливість їх подальшого використання [18].

Біологічні методи ремедіації ґрунту пропонують часткові рішення проблем у цій галузі. З економічної точки зору, вони забезпечують переваги, уникаючи необхідності значних одноразових інвестицій. Пов'язані з цим витрати можна розподілити на кілька років. Ці методи також усувають необхідність обов'язкового розкопування ґрунту та можуть застосовуватися на більших площах. Крім того, вони не потребують внесення у ґрунт специфічних шкідливих хімічних сумішей, розчинів або реагентів, запобігаючи таким чином вторинному забрудненню [19, 20].

Біологічна ремедіація ґрунту від важких металів та радіонуклідів досягається шляхом біотрансформації. Мікроорганізми, такі як бактерії, гриби та мікроскопічні водорості, що мешкають у ґрунті, є ефективними біотичними утвореннями, що здатні ефективно поглинати або трансформувати сполуки важких металів та радіонуклідів [21].

Загальними недоліками біологічних методів є їхня сповільнена ефективність, тривалість дії та залежність від кліматичних умов, включаючи швидкість розвитку мікроорганізмів у кліматичних умовах зі змінною температурою та вологістю протягом року [22, 23].

У рамках дослідження перетворень таких металів, як Pb, Zn та Cd, вченими було виявлено низку закономірностей. Метали не можуть розкладатися мікроорганізмами, що беруть участь у рекультиватії забрудненого ґрунту, але вони можуть переходити з однієї окисленої форми в іншу. Це дозволяє їм фіксуватися у нерозчинній формі та вилучатися з біогеохімічних циклів міграції у навколишньому середовищі [24].

Загалом, у методології біоремедіації використовуються такі типи мікроорганізмів *Bacillus sp.*, *Lysinibacillus sp.*, *Rhodococcus sp.*, *Ascomycota*, *Basidiomycota*, *Perenniporia subtephropora*, *Daldinia starbaeckii*, *Phanerochaete concrescens* тощо [25].

Фіторемедіація – біологічний метод очищення за допомогою рослин, які накопичують токсини у своїй біомасі. Він застосовується для пришвидшеного повернення забруднених земель до сільськогосподарського виробництва [26, 27].

Фіторе mediaція є безпечною та економічно ефективною порівняно з традиційними фізичними та хімічними процедурами зменшення забруднення ґрунту та води [28, 29].

Наразі існує чітке переконання того, що фіторе mediaція може бути ефективною для видалення різноманітних забруднювачів ґрунту, включаючи нафтові вуглеводні, відходи боєприпасів (тротил), метали та металоїди, сіль та радіоізотопи [30].

Індонезійські вчені повідомляють про часткове зниження концентрації кадмію у ґрунті за рахунок вирощування на ньому п'яти місцевих видів рослин. Початковий вміст важкого металу у ґрунті до фіторе mediaції перевищував порогове значення (2,26 мг/кг). Зниження вмісту кадмію, досягнуте кожною рослиною, становило: *Vetiveria zizanioides* (71,2 %), *Eleusine indica* L. (58,9 %), *Ageratum conyzoides* L. (52,2 %), *Euphorbia hirta* (51,8 %) та *Chromolaena odorata* (22,1 %) [31].

Українськими науковцями встановлено, що буркун білий (*Melilotus albus*) накопичує цезій та важкі метали у своїй біомасі, але водночас виробляє нектар і пилок з безпечно низьким рівнем ^{137}Cs . Таким чином, ця культура безпечна для бджільництва у зоні забруднення Чорнобильською АЕС. Вирощування *M. albus* протягом двох років (2021–2022) на піщаному дерново-підзолистому ґрунті у Житомирській області збільшило вміст легкогідролізованого азоту на 29,9 %, зменшило вміст рухомого фосфору на 18,2 %, рухомих форм кадмію на 38,5 %, Hg на 25 %, Pb на 24,5 %, Cu на 18,5 %, Zn на 14,9 %, ^{137}Cs на 8 % [32].

Згідно даних О.О. Тетерук і колег визначення питомої активності ^{137}Cs у зеленій масі та насінні олійних культур свідчить, що для них властиво підвищене накопичення радіонуклідів. За результатами радіологічних досліджень було встановлено, що найвищу питому активність ^{137}Cs як у зеленій масі, так і насінні зафіксовано у рослинах гірчиці білої, а найнижчу – у соняшнику. Результати досліджень підтверджують, що внесення мінеральних добрив сприяє підвищенню урожайності сільськогосподарських культур та зниженню вмісту ^{137}Cs у рослинах. Це в свою чергу знижує рівень питомої активності ^{137}Cs у вирощеній продукції [33].

У Швеції протягом 8–14 років, починаючи з червня 1986 року, на сильно забруднених після радіоактивних опадів різних типах ґрунтах проводили дослідження довгострокового перенесення ^{137}Cs із ґрунту у траву. Перенесення ^{137}Cs у траву загалом демонструвало експоненціальне зниження на більшості полів протягом багатьох років. Темпи зниження були найбільш виражені у суглинистих та мулистих ґрунтах, тоді як найменш помітні – у піщаних, піщаних та торф'яних ґрунтах. Медіана ефективного періоду напіврозпаду ^{137}Cs у траві становила 4,5 роки з діапазоном від 2 до 18 років. Поглинання ^{137}Cs рослинами не корелювало з концентрацією калію в тканинах трави, однак активна концентрація ^{137}Cs у траві негативно корелювала із вмістом калію у рослинах, вирощених на полях з високим рівнем осадження [34].

П'ятдесят шість місцевих японських сортів з родини Капустяних (*Brassicaceae*), а саме *Brassica rapa* (40 сортів), *Brassica juncea* (10 сортів) та *Brassica napus* (6 сортів) були оцінені на предмет мінливості росту та поглинання і накопичення ^{137}Cs у поєднанні зі штамом *Bacillus pumilus*. Загалом, інокуляція призвела до значного збільшення поглинання ^{137}Cs у 22 сортах, тоді як у семи сортах воно значно зменшилося. Таким чином, відмічено сортову різницю рослин з родини Капустяних по накопиченню радіоактивного цезію у листостебловій масі [35].

Науковцями з Китаю виявлено, що ріпак озимий має значну здатність накопичувати кадмій (Cd) з ґрунту. Це робить його ключовим видом для безпечного використання сільськогосподарських угідь, збагачених Cd. Згідно результатів досліджень

ріпак озимий накопичив відносно високі концентрації Cd ($1,89\text{--}5,45\text{ мг/кг}^{-1}$), причому понад 85 % затримувалося у листостебловій масі і лише невелика частина переміщувалася у ріпакову олію [36].

Інші вчені встановили, що безпечний підхід до вирощування ріпаку замість пшениці значно зменшив канцерогенні та неканцерогенні ризики. Концентрації важких металів у ріпаковій олії були нижчими за ліміти, зазначені в китайському національному стандарті на харчові продукти, а концентрації важких металів у побічних продуктах (ріпаківий шрот та солома) були нижчими за ліміти, зазначені в китайських національних стандартах на органічні добрива та корми [37].

Лабораторними дослідженнями встановлено, що найвищий рівень переходу ^{137}Cs із субстрату (кварцевий пісок) до рослин (збільшення на 50 % порівняно з контролем) спостерігався після інокуляції насіння ріпаку озимого *Azotobacter chroococcum*. Найкращі результати щодо зменшення накопичення радіонуклідів ^{137}Cs (на 30 % менше) були відзначені після інокуляції *Burkholderia sp.* Крім того, *Vacillus megaterium* продемонстрував підвищену здатність накопичувати ^{137}Cs [38].

Вченими із Литви встановлено, що ріпак озимий, вирощений за підвищеного рівня вологи у ґрунті, мав вищу біомасу (+18 %) порівняно з тим, що вирощувався за зниженого рівня вологи, однак при цьому і шкідливий вплив Cd був більш помітнішим. Знижений рівень вологи призвів до зменшення поглинання кадмію, і навпаки, підвищений рівень вологи сприяв зростанню рівня поглинання цього елемента. Оптимальний рівень вологи забезпечує найвищу ефективність видалення Cd, тоді як дефіцит або надлишок ґрунтової вологи обмежує потенціал ріпаку щодо видалення Cd з ґрунту та подовжував період відновлення [39].

В Японії, через 1,5 роки після аварії на АЕС Фукусіма-1, було проведено дослід із вирощуванням ріпаку озимого на трьох тестових полях, що зазнали впливу різних рівнів радіонуклідного забруднення. Встановлено, що в значній мірі ^{137}Cs накопичувався у коренях, стеблі та пагонах. Тоді як в екстрагованій з насіння олії ^{137}Cs не було виявлено [40].

Висновки. Проведений аналіз практичного досвіду та наукових підходів у ремедіації радіоактивно забруднених ґрунтів та повернення таких земель у сівозміну вказує на значну проблематику у світовому масштабі. Тому, вирішення поставлених завдань потребує розробки агроекологічних основ ресурсозберігаючих та екологічнобезпечних технологій із використанням нових штамів мікроорганізмів і різних видів рослин та врахування впливу воєнних дій в Україні. Досить перспективною культурою для фіторемердіації в Україні є ріпак озимий. Адже він здатний поглинати та акумулювати радіонукліди, обмежує їх потрапляння у харчовий ланцюг, покращує біологічну активність і структуру ґрунту, може використовуватись для виробництва біопалива.

СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ:

1. Raichuk L. A., Shvydenko I. K., Chobotko H. M. Scenarios of agricultural activities on radioactively contaminated lands of Ukrainian Polissya in the conditions of post-war reconstruction. *Modern agronomy trends: innovation, sustainable development and the future of agriculture*: Scientific monograph. Chapter 6. Riga, Latvia : "Baltija Publishing". 2025. pp. 138–157. DOI: <https://doi.org/10.30525/978-9934-26-588-4-6>
2. Райчук Л. А., Швиденко І. К., Чоботько Г. М. «Зелена» оптимізація агровиробничої діяльності як основа реабілітації забруднених радіонуклідами агроландшафтів українського Полісся. *Агроекологічний журнал*. 2024. № 4. с. 24–32. DOI: <https://doi.org/10.33730/2077-4893.4.2024.317142>

3. Симканич О. І. та ін. Розподіл важких металів та радіонуклідів в об'єктах заповідних територій Закарпаття. *Науковий вісник Ужгородського університету* : серія : Фізика. Ужгород : Видавництво УЖНУ «Говерла», 2015. Вип. 37. С. 139–145.
4. Feng G. et al. Response of Soil Microbial Communities to Natural Radionuclides along Specific-Activity Gradients. *Ecotoxicology and Environmental Safety*. 2022. Vol. 246. 114156. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ecoenv.2022.114156>
5. Awasthi G. et al. Sustainable Amelioration of Heavy Metals in Soil Ecosystem: Existing Developments to Emerging Trends. *Minerals*. 2022. Vol. 12. 1. DOI: <https://doi.org/10.3390/min12010085>
6. Chandra D., General T., Nisha, Chandra S. Microorganisms: An Asset for Decontamination of Soil. *Smart Bioremediation Technologies*. Academic Press: Cambridge, MA, USA. 2019. pp. 319–345. DOI: <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-818307-6.00017-2>
7. Akbay C., Aytop H., Dikici H. Evaluation of Radioactive and Heavy Metal Pollution in Agricultural Soil Surrounding the Lignite-Fired Thermal Power Plant Using Pollution. *International Journal of Environmental Health Research* 2023. Vol. 33. pp.1490–1501. DOI: <https://doi.org/10.1080/09603123.2022.2102157>
8. Basta N. T., Ryan J. A., Chaney R. L. Trace Element Chemistry in Residual-Treated Soil: Key Concepts and Metal Bioavailability. *Journal of Environmental Quality* 2005. Vol. 34. pp. 49–63. DOI: <https://doi.org/10.2134/jeq2005.0049dup>
9. Rosen V., Chen Y. Effects of Compost Application on Soil Vulnerability to Heavy Metal Pollution. *Environmental Science and Pollution Research*. 2018. Vol. 25. pp. 35221–35231. DOI: <https://doi.org/10.1007/s11356-018-3394-z>
10. Basu S. et al. Bioremediation Strategies to Overcome Heavy Metals and Radionuclides from the Environment. *Development in Wastewater Treatment Research and Processes*. Elsevier: Amsterdam, The Netherlands. 2022. pp. 287–302. DOI: <https://doi.org/10.1016/B978-0-323-85657-7.00010-9>
11. Булигін С. Ю., Вітвіцький С. В., Буланій О. В., Тонха О. Л. *Моніторинг якості ґрунтів*. К. Видавництво НУБіП України. 2019. 421 с.
12. Мельничук А. О., Тараріко М. Ю. Екоенергетична та економічна ефективність альтернативних систем удобрення на радіоактивно забруднених ґрунтах Полісся України. *Агроекологічний журнал*. 2015. Vol. 1. С. 121–125. DOI: <https://doi.org/10.33730/2077-4893.1.2015.272282>
13. Horvath M., Heltai G., Várhegyi A., Mbokazi L. A. Study on the Possible Relationship between Physico-Chemical Properties of the Covering Soil and the Mobility of Radionuclides and Potentially Toxic Elements in a Recultivated Spoil Bank. *Minerals* 2022. Vol. 12, p.1534. DOI: <https://doi.org/10.3390/min12121534>
14. Selim H. M. (Ed.) *Phosphate in Soils*. CRC Press: Boca Raton, FL, USA. 2018. 381 p. DOI: <https://doi.org/10.1201/9781351228909>
15. Yoon I. H. et al. Characteristic and Remediation of Radioactive Soil in Nuclear Facility Sites: A Critical Review. *Environmental Science and Pollution Research*. 2021. Vol. 28. p. 67990–68005. DOI: <https://doi.org/10.1007/s11356-021-16782-2>
16. Bhatt J., Desai S., Wagh N. S., Lakkakula J. New Bioremediation Technologies to Remove Heavy Metals and Radionuclides. *In Industrial Wastewater Reuse*. Springer Nature Singapore: Singapore. 2023. pp. 267–316. DOI: https://doi.org/10.1007/978-981-99-2489-9_14
17. Fekiacova Z., Cornu S., Pichat S. Tracing contamination sources in soils with Cu and Zn isotopic ratios. *Science of The Total Environment*. 2015. Vol. 517. pp. 96–105. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2015.02.046>
18. Yang Z. et al. Study on Remediation Effect of Radioactive-Heavy Metal Contaminated Soil in Stone Coal Mines by Chemical Elution. *Coal Science and Technology*. 2022. Vol. 50, pp. 261–266. DOI: <https://doi.org/10.13199/j.cnki.cst.2021-0041>

19. Singh B. S. M., Singh D., Dhal N. K. Enhanced Phytoremediation Strategy for Sustainable Management of Heavy Metals and Radionuclides. *Case Studies in Chemical and Environmental Engineering*. 2021. Vol. 5, p. 100176 DOI: <https://doi.org/10.1016/j.cscee.2021.100176>
20. Mehjabeen et al. Bioremediation of Soil: An Overview. In *Microbes and Microbial Biotechnology for Green Remediation*. Elsevier: Amsterdam, The Netherlands. 2022. pp. 13–27. DOI: <https://doi.org/10.1016/B978-0-323-90452-0.00033-5>
21. Sethi S. Holistic Approach to Remediate Heavy Metals and Radionuclides. In *Industrial Wastewater Reuse*. Springer Nature: Singapore. 2023. pp. 113–132. DOI: https://doi.org/10.1007/978-981-99-2489-9_6
22. Phian S., Nagar S., Kaur J., Rawat C. D. Emerging Issues and Challenges for Microbes-Assisted Remediation. In *Microbes and Microbial Biotechnology for Green Remediation*. Elsevier: Amsterdam, The Netherlands. 2022. pp. 47–89. DOI: <https://doi.org/10.1016/B978-0-323-90452-0.00026-8>
23. Xing Y. et al. Effective Immobilization of Heavy Metals via Reactive Barrier by Rhizosphere Bacteria and Their Biofilms. *Environmental Research*. 2022. Vol. 207. p. 112080. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.envres.2021.112080>
24. Thakare M. et al. Understanding the Holistic Approach to Plant-Microbe Remediation Technologies for Removing Heavy Metals and Radionuclides from Soil. *Current Research in Biotechnology*. 2021. Vol. 3, pp. 84–98. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.crbiot.2021.02.004>
25. Mendoza-Burguete Y. et al. Global Situation of Bioremediation of Leachate-Contaminated Soils by Treatment with Microorganisms: A Systematic Review. *Microorganisms*. 2023. Vol. 11, p. 857. DOI: <https://doi.org/10.3390/microorganisms11040857>
26. Thakur S. et al. Plant-driven removal of heavy metals from soil: Uptake, translocation, tolerance mechanism, challenges, and future perspectives. *Environmental Monitoring and Assessment*. 2016. Vol. 188, p. 206. DOI: <https://doi.org/10.1007/s10661-016-5211-9>
27. Kaffle A. et al. Phytoremediation: Mechanisms, plant selection and enhancement by natural and synthetic agents. *Environmental Advances*. 2022. Vol. 8, p. 100203. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.envadv.2022.100203>
28. Jach M. E., Sajnaga E., Ziąja M. Utilization of legume-nodule bacterial symbiosis in phytoremediation of heavy metal-contaminated soils. *Biology (Basel)* 2022. Vol. 11(5). p. 676. DOI: <https://doi.org/10.3390/biology11050676>
29. Dhanwal P. et al. Recent advances in phytoremediation technology. *Advances in Environmental Biotechnology*. 2017 pp. 227–241. DOI: https://doi.org/10.1007/978-981-10-4041-2_14
30. Gerhardt K. E., Gerwing, P. D., Greenberg B.M. Opinion: Taking phytoremediation from proven technology to accepted practice. *Plant Science* 2017. Vol. 256. pp.170–185. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.plantsci.2016.11.016>
31. Hamzah A., Hapsari R. I., Wisnubroto E. I. Phytoremediation of cadmium-contaminated agricultural land using indigenous plants. *International Journal of Agriculture and Environmental Research*. 2016. Vol. 2, pp. 8–14.
32. Snitynskyi V. et al. Phytoremediation of ¹³⁷Cs contaminated sod-podzolic soil in Northern Polissia white sweet clover (*Melilotus albus*). *International Journal of Environmental Studies*, 2023. Vol. 81(1), pp. 223–229. DOI: <https://doi.org/10.1080/00207233.2023.2270305>
33. Тетерук О. О., Феценко В. П., Ландін В. П., Швиденко І. К. Перспективи використання олійних культур, вирощених на радіоактивно забруднених територіях. *Агроекологічний журнал*. 2018. с. 59–65. DOI: <https://doi.org/10.33730/2077-4893.3.2018.148315>
34. Vinichuk M., Simonsson M., Larsson M., Rosén K. (2025) Long-term transfer of ¹³⁷Cs in sensitive agricultural environments after the Chernobyl fallout in Sweden.

Journal of Environmental Radioactivity. 2025. Vol. 282. p. 107621 DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jenvrad.2025.107621>

35. Djedidi S. et al. Growth and ^{137}Cs uptake and accumulation among 56 Japanese cultivars of *Brassica rapa*, *Brassica juncea* and *Brassica napus* grown in a contaminated field in Fukushima: Effect of inoculation with a *Bacillus pumilus* strain. *Journal of Environmental Radioactivity* 2016. Vol. 157, pp. 27-37. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jenvrad.2016.02.024>

36. Yu W. et al. Cadmium accumulation and isotope fractionation in soil – oilseed rape (*Brassica napus* L.) system in a typical Karst region. *Journal of Hazardous Materials*. 2026 Vol. 501. p. 140869. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2025.140869>

37. Guo J. et al. Safe utilization of cadmium- and lead-contaminated farmland by cultivating a winter rapeseed/maize rotation compared with two phytoextraction approaches. *Journal of Environmental Management*. 2022. Vol. 304, 15 p. 114306. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2021.114306>

38. Pareniuk O. et al. Modification of ^{137}Cs transfer to rape (*Brassica napus* L.) phytomass under the influence of soil microorganisms. *Journal of Environmental Radioactivity*. 2015. Vol. 149, pp. 73–80. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jenvrad.2015.07.003>

39. Kniupiytè I. et al. Oilseed rape (*Brassica napus* L.) potential to remediate Cd contaminated soil under different soil water content. *Journal of Environmental Management*. 2023. p. 116627. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2022.116627>

40. Kanayama Y. et al. Radiocesium Distribution in Soil and *Brassica napus* Grown in Contaminated Soils. *The Horticulture Journal*. 2018. Vol. 87. Issue 2. pp. 250-257. DOI: <https://doi.org/10.2503/hortj.OKD-109>

Дата першого надходження статті до видання: 20.04.2026

Дата прийняття статті до друку після рецензування: 22.05.2026

Дата публікації (оприлюднення) статті: 29.05.2026