

# БІОРЕМЕДІАЦІЯ ҐРУНТІВ, ЗАБРУДНЕНИХ РАДІОАКТИВНИМИ ІЗОТОПАМИ

Неділько О.В., Зеленюк А.Н., Жукова В.С.

Національний технічний університет України

«Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»

## *Abstract*

*This article describes methods of bioremediation of soils contaminated with radioactive isotopes because of human activities such as nuclear power. Soils are particularly sensitive to the accumulation of radionuclides and their subsequent migration to other territories and other living organisms. Therefore, their remediation is necessary to prevent further spread of contamination and reduce its impact.*

**Keywords:** *radioactive isotopes, soil bioremediation, microorganisms, phytoremediation, fungi, biochar.*

**Вступ.** На цей час в Україні розташовані 4 атомні електричні станції (АЕС) із сумарною кількістю в 15 ядерних енергетичних установок та загальною встановленою потужністю в 13835 МВт. Робота підприємств ядерного паливного циклу та АЕС супроводжується надходженням у навколишнє середовище певної частини радіоактивних ізотопів. Крім цього, більшість енергоблоків українських АЕС збудовані за радянських часів і терміни їх експлуатації підходять до завершення: в період з 2025 по 2037 роки більша частина реакторів мають бути зупинені. Їх подальший шлях – це зняття з експлуатації, захоронення та утилізація відпрацьованого ядерного палива і високорадіоактивних відходів згідно з чинним законодавством [1, 2]. Одним з етапів є здійснення заходів з реабілітації радіоактивно забруднених територій [3].

Також варто зазначити, що аварія на Чорнобильській АЕС у 1986 р. спричинила значні забруднення радіоактивними ізотопами (переважно  $^{137}\text{Cs}$ ,  $^{90}\text{Sr}$ ) великої частини території України [4].

Все перераховане вище входить до основних джерел первинного забруднення ґрунтів радіоактивними речовинами, що спочатку зосереджуються у верхньому шарі товщиною 3-5 см. З часом ця ситуація змінюється внаслідок міграції та фізико-хімічних властивостей радіонуклідів, погодно-кліматичних умов, механічних і мінералогічних властивостей ґрунтів. Радіаційне забруднення проникає у глибші шари ґрунту, зв'язується з його компонентами, надходить у рослини та в наступні ланки харчового ланцюга [5].

Тому, метою нашої роботи є пошук методів біоремедіації ґрунтів, що забруднені радіоактивними ізотопами, задля їх очищення, перешкодження подальшої міграції радіонуклідів на більші території та в ґрунтові води і потрапляння їх через харчовий ланцюг до інших живих організмів та людини.

**Матеріали та методи.** Було проведено аналітичний огляд різних методів біоремедіації ґрунтів, що забруднені радіоактивними ізотопами внаслідок техногенної діяльності людини.

**Результати та обговорення.** Біологічні методи очищення ґрунту передбачають виведення радіонуклідів з використанням рослин, мікроорганізмів або ж грибів.

Метаболічна активність мікроорганізмів сприяє перетворенню розчинних радіоактивних сполук у нерозчинні форми [6].

Одним із методів мікробної біоремедіації є ферментативне відновлення. Мікроорганізми інактивують радіонукліди, приєднуючи до них електрони, що переводить їх з розчинного в нерозчинний стан. За такою схемою бактерії *Geobacter metallireducens* GS15 і *Shewanella oneidensis* відновлюють окиснений розчинний плутоній Pu(VI/V) до відновленої нерозчинної форми Pu(IV). Перетворені нерозчинні форми радіонуклідів складніше піддаються процесам міграції та легше виводяться з ґрунту [7].

Деякі радіаційно-стійкі бактерії можуть бути генетично модифіковані для біоремедіації радіоактивних відходів. Так, *Deinococcus radiodurans* може витримувати надзвичайно високі дози радіоактивного опромінення (приблизно 10-20 кГр) завдяки антиоксидантним властивостям і посиленому механізму відновлення ДНК. Було показано, що генетично модифіковані бактерії виду *D. radiodurans*, що містять гени *phoN* від *Salmonella enterica* та *phoK* від *Sphigomonas sp.* (кодуєть неспецифічну кислоту фосфатазу та рибозо-фосфат-пірофосфокіназу відповідно), мають здатність ефективно осаджувати уран з розбавлених ядерних відходів. Обмеження у застосуванні *D. radiodurans* пов'язане лише з нездатністю існувати в середовищах з підвищеною кислотністю [8].

Біомінералізація включає комплексоутворення та сорбцію реакційноздатними ділянками на поверхні клітин мікроорганізмів. Це приводить до утворення осаду мінералів, які містять радіонукліди. Так, накопичення полікристалічного  $\text{NaUO}_2\text{PO}_4$  спостерігалось всередині і навколо клітинної стінки *Citrobacter sp.* Біомінералізація може бути прискорена шляхом зв'язування радіонукліду з мікроорганізмами, що здатні до утворення біоплівки. Органічні кислоти, такі як лимонна, винна та щавлева, каталізують процес осадження [9].

Фіторемедіація ґрунтується на здатності рослин вбирати радіонукліди з ґрунту через коріння. Було показано, що *Acacia sp.* (*Acacia albida* та *Acacia nilotica*) здатні поглинати велику кількість урану з ґрунту та накопичувати його в своєму корінні та пагонах. Високу здатність до акумуляції радіонуклідів також має *Phragmites australis* – рослина поглинає 16,6 мг/кг (в перерахунку на суху масу рослин) U та 8,68 мг/кг Th [10]. Подальша обробка таких рослин передбачає компостування, ущільнення з метою зменшення їх об'єму та захоронення у спеціальних сховищах для радіоактивних відходів [11].

Біоремедіація з використанням грибів. Ґрунти забруднені радіоактивними ізотопами часто мають високу кислотність. Деякі представники дріжджів стійкі до радіаційного випромінювання, також вони є толерантними до низьких значень рН. Так, *Rhodotorula taiwanensis* MD1149 в ході досліджень виявилась найбільш стійкою до гамма-випромінювання та здатна рости за 66 Гр/год (66 Зв) і рН 2,3. Пропонується використання цього штаму для відновлення середовищ, де радіація та низький рН є основними факторами, що обмежують застосування інших способів біоремедіації [6]. Таким чином, можна використати запропонований метод для відновлення високозабруднених радіоактивними

ізотопами ділянок Чорнобильської зони відчуження, кислотність ґрунтів яких є підвищеною та перебуває в межах рН від 4,5 до 5,5 [12].

Біовугілля – вуглецевий матеріал, отриманий шляхом піролізу біомаси, демонструє значний потенціал для рекультивації забруднених ураном ґрунтів. Біовугілля зменшує здатність урану до міграції за допомогою різноманітних механізмів, включаючи утворення поверхневих комплексів, відновлення, іонний обмін і фізичну адсорбцію. Крім того, біовугілля покращує мікросередовище ґрунту, забезпечуючи сприятливі умови для стимулювання росту рослин та обмежує його накопичення в рослинах [13].

**Висновки.** Проведено опис методів біоремедіації ґрунтів забруднених радіонуклідами з використанням мікроорганізмів, рослин та грибів, які є менш витратними та більш безпечними для природнього середовища. Проте на цей час ці методи потребують подальших досліджень та впровадження в майбутньому. Поєднання біологічних методів ремедіації дасть змогу розробити ефективну стратегію для очищення ґрунтів забруднених радіоактивними ізотопами.

### **Список використаної літератури:**

1. Uatom.org : веб-сайт. URL: <https://www.uatom.org/> (дата звернення: 21.04.2024).
2. Про поводження з радіоактивними відходами : Закон України від 30.06.1995 р. № 255/95-ВР : станом на 1 січ. 2024 р.
3. Пасюк О. Неможливо впоратись. Поводження з радіоактивними відходами в Україні після аварії на Чорнобильській АЕС. «Управління в сфері поводження з радіоактивними відходами: міжнародне порівняння. Том другий. 2017. Т. 2.
4. ДСП "Чорнобильська АЕС" : веб-сайт. URL: <https://chnpp.gov.ua/ua/> (дата звернення: 21.04.2024).
5. Гудков І. М., Кашпаров В., Паренюк О. Радіоекологічний моніторинг : навч. посіб. Київ, 2018. С. 55-65.
6. Patel R., Mugunthan J., Singh P. Microbial bioremediation and biodegradation of radioactive waste contaminated sites. *Microbes and Microbial Biotechnology for Green Remediation*. 2022. DOI: [10.1016/B978-0-323-90452-0.00044-X](https://doi.org/10.1016/B978-0-323-90452-0.00044-X)
7. Bioremediation: a genuine technology to remediate radionuclides from the environment / D. Prakash та ін. *Microbial Biotechnology*. 2013. Т. 6, № 4. С. 349–360. Режим доступу: <https://doi.org/10.1111/1751-7915.12059> (дата звернення: 23.04.2024).
8. Sun-Wook Jeong, Yong Jun Choi. Research Perspective of an Extremophilic Bacterium, *Deinococcus radiodurans* on Bioremediation of Radioactive Wastes. *Applied Chemistry for Engineering*. 2017. Т. 28, № 2. С. 133–140. DOI: [doi.org/10.14478/ace.2017.1003](https://doi.org/10.14478/ace.2017.1003)
9. Understanding the holistic approach to plant-microbe remediation technologies for removing heavy metals and radionuclides from soil / M. Thakare та ін. *Current Research in Biotechnology*. 2021. Т. 3. С. 84–98. DOI: [doi.org/10.1016/j.crbiot.2021.02.004](https://doi.org/10.1016/j.crbiot.2021.02.004)
10. 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*. 2022. Vol. 5. P. 100176. DOI: [10.1016/j.cscee.2021.100176](https://doi.org/10.1016/j.cscee.2021.100176)
11. Malhotra R., Agarwal S., Gauba P. Phytoremediation of Radioactive Metals. *Journal of Civil Engineering and Environmental Technology*. 2014. Т. 1, № 5. С. 75–79.
12. Паньків З. П. ҐРУНТИ УКРАЇНИ : навч. посіб. Львів : Львів. нац. ун-т ім. Ів. Франка. 112 с.
13. Biochar-mediated remediation of uranium-contaminated soils: evidence, mechanisms, and perspectives / F. Huang та ін. *Biochar*. 2024. Т. 6, № 1. DOI: <https://doi.org/10.1007/s42773-024-00308-3>