

ENVIRONMENTAL ASPECTS OF ENVIRONMENTAL RESTORATION: A COMPLEX METHOD OF DEACTIVATION OF RADIOACTIVELY CONTAMINATED SOIL

Zabulonov Yu.L., Melnychenko T.I., Kadoshnikov V.M., Kuzenko S.V., Odukalets L.A., Petrenko O.D.

ЕКОЛОГІЧНІ АСПЕКТИ ВІДНОВЛЕННЯ ДОВКІЛЛЯ: КОМПЛЕКСНИЙ СПОСІБ ДЕЗАКТИВАЦІЇ РАДІОАКТИВНО ЗАБРУДНЕНИХ ҐРУНТІВ

П

¹ЗАБУЛОНОВ Ю.Л.,
¹МЕЛЬНИЧЕНКО Т.І.,
¹КАДОШНИКОВ В.М.,
¹КУЗЕНКО С.В.,
¹ОДУКАЛЕЦЬ Л.А.,
²ПЕТРЕНКО О.Д.

¹ДУ «Інститут геохімії навколишнього середовища Національної академії наук України», Київ, Україна
²ДУ «Інститут громадського здоров'я ім. О.М. Марзєєва НАМН України», Київ, Україна

проблема техногенного забруднення довкілля стає ще більш актуальною у наш час, оскільки рівень індустріалізації та використання ресурсів продовжує стрімко зростати, що призводить до збільшення кількості викидів та відходів, які виникають під час звичайної діяльності та через аварійні ситуації на промислових підприємствах.

Наслідки такого забруднення стають дедалі більш очевидними і відчутними для нашого суспільства. Відновлення екосистем та збереження здоров'я людей стають найважливішими завданнями, які потребують негайних дій та впровадження нових

методів протидії забрудненню.

Однією з таких нагальних проблем постає питання протидії радіаційному забрудненню ґрунтів. Останні дослідження показали, що ґрунти піддаються ризику радіаційного забруднення через різноманітні джерела, такі як ядерні аварії, викиди радіоактивних частинок промисловими об'єктами і порушення правил зберігання радіоактивних речовин.

Вищезгадане створює загрозу радіаційного забруднення ґрунтів та може мати серйозні наслідки для екосистем та здоров'я людей. Таким чином, вивчення та розробка методів дезактивації та очищення радіа-

ЕКОЛОГІЧНІ АСПЕКТИ ВІДНОВЛЕННЯ ДОВКІЛЛЯ: КОМПЛЕКСНИЙ СПОСІБ ДЕЗАКТИВАЦІЇ РАДІОАКТИВНО ЗАБРУДНЕНИХ ҐРУНТІВ

¹Забулонов Ю.Л., ¹Мельниченко Т.І.,
¹Кадошников В.М., ¹Кузенко С.В.,
¹Одукалець Л.А., ²Петренко О.Д.

¹ДУ «Інститут геохімії навколишнього середовища Національної академії наук України», Київ, Україна

²ДУ «Інститут громадського здоров'я ім. О.М. Марзєєва НАМН України», Київ, Україна

Мета дослідження: розробка та опрацювання нового ефективного методу дезактивації радіаційно забруднених ґрунтів для зменшення негативного впливу радіонуклідів на довкілля та здоров'я людини.

Матеріали і методи дослідження. Об'єкт дослідження – піщаний ґрунт, забруднений радіоцезієм.

Методи дослідження: рентгенівська

дифрактометрія, дисперсійний аналіз, гамма-спектрометрія.

Результати. Запропоновано комплексний метод очищення радіоактивно забрудненого ґрунту, що об'єднує плазмохімічну обробку суспензії «ґрунт – вода» з подальшим відокремленням очищеного ґрунту та коагуляційно-сорбційне очищення утвореного супернатанту. Супернатант містить дисперсію у водній фазі мікро- та наночастинок, які містять радіоактивні речовини. Для осадження твердої фази використано принцип гетерокоагуляції, що зменшує міграцію радіоактивних частинок у дисперсійне середовище, з використанням позитивно зарядженого колоїду гідроксиду заліза (III) як коагулянту. Для дезактивації рідкої фази супернатанту використано комплексний сорбент на основі мікро- та наночастинок гідроксиду заліза, модифікованих фероціанідами нікелю-калію, та високодисперсні шаруваті алюмосилікати. При цьому ступінь дезактивації

© Забулонов Ю.Л., Мельниченко Т.І., Кадошников В.М., Кузенко С.В.,
Одукалець Л.А., Петренко О.Д. СТАТТЯ, 2024.

ційно забруднених ґрунтів стає надзвичайно важливою та актуальною задачею для наукових екологічних досліджень.

Нині радіоактивне забруднення ґрунтів спостерігається переважно там, де розміщені підприємства атомної енергетики, а також нафтопереробні підприємства, об'єкти вугільної промисловості, місця видобутку мінеральної сировини, яка містить радіонукліди [1-4].

Шляхи надходження радіонуклідів у довкілля можна розглядати за типами середовищ: повітрям, водою та ґрунтом. Радіоактивні частинки, які розповсюджуються у повітрі, воді та поверхневому пилю, можуть швидко й безпосередньо потрапляти до організмів живих істот, включаючи людей, та викликати негативні наслідки.

Порівняно з цим забруднення ґрунтів має триваліший вплив, оскільки процес потрапляння радіоактивних речовин до організму людини та тварин



ПРОБЛЕМИ ЧОРНОБИЛЯ

завичай пов'язаний з їх поглинанням рослинами [5].

При цьому основним шляхом надходження (добре вивченого) є харчовий. Дослідження дозволили визначити коефіцієнти переходу радіонуклідів із однорічних зернових та овочевих культур, а також багаторічних плодкових дерев, дикорослих рослин та грибів, що використовуються у харчуванні, до організму людини. Вивчено перехід радіонуклідів із трави та кормових рослин до молока та м'яса тварин, із донних відкладень водоймищ до водних рослин та риби [6-12].

Також є інші, менш очевидні шляхи надходження.

Наприклад, радіонукліди можуть накопичуватись у багаторічних рослинах і потім вивільнятися під час спалювання деревини гілок та опалого листя. Цей процес вже визнаний як значущий фактор радіаційного забруднення повітря на території, які постраждали від аварії на Чорнобильській АЕС, де проживає населення [12].

Вплив радіоактивного забруднення ґрунтів на здоров'я людини є аналогічним іншим наслідкам тривалого впливу радіонуклідів на організм. Вони включають підвищений ризик розвитку різних видів раку (лейкемія, рак щитоподібної залози, легенів, кишечника тощо), порушення імунної системи, пошкодження ДНК з наступним виникненням мутацій, вплив на репродуктивну систему (можливість виникнення аномалій у дітей та проблеми з фертильністю), а також різноманітні інші захворювання (серцево-судинні захворювання, захворювання щитоподібної залози, хронічні захворювання дихальних шляхів і нервової системи) [13].

Ризик виникнення загроз для здоров'я населення, їхній ступінь та прийнятність ризику безпосередньо пов'язані з рівнем забруднення ґрунту. У зв'язку з цим застосовують різні способи протидії забрудненню ґрунтів і видалення радіоактивних речовин із екосистеми:

□ фіторемедіація – використання та подальше ви-

ґрунту становить 91,6%, а супернатанту – 98%. Застосування цього методу дозволяє отримати очищений ґрунт, який можна використовувати у процесах рекультивациі ґрунтів, а також очищену воду. Передбачається багаторазове використання технологічної води, що перешкоджає додатковому забрудненню довкілля радіоактивними речовинами. Радіоактивний шлам придатний для компактування і подальшого зберігання у сховищах радіоактивних відходів.

Висновки. За результатами даного дослідження розроблено та опрацьовано новий ефективний метод дезактивації ґрунту, який є ефективним і перспективним підходом у боротьбі з наслідками аварій на атомних електростанціях та іншими джерелами радіаційного забруднення. Він дозволяє ефективно видаляти радіоактивні речовини із ґрунту та води, зменшуючи негативний вплив на довкілля та здоров'я людей. Основні переваги методу полягають у його високій ефективності, можливості повторного використання технологічної води, а також у зменшенні обсягу радіоактивних відходів, які потребують подальшої обробки та зберігання. Запропонований підхід є важливим кроком у збереженні екосистем та забезпеченні безпеки життя та здоров'я населення.

Ключові слова: ґрунт, радіоактивне забруднення, дезактивація, плазмохімічна обробка, сорбція, мікро- і наночастинки.

далення рослин, які мають здатність активно акумулювати радіонукліди із ґрунту та використовувати їх для свого росту;

□ біоремедіація – використання мікроорганізмів;

□ фітосанція – використання спеціально відібраних рослин, які мають здатність фільтрувати та очищати воду і ґрунт від радіоактивних речовин;

□ іммобілізація – використання різних матеріалів або хімічних реагентів для зменшення мобільності та доступності радіоактивних речовин у ґрунті;

□ захист та ізоляція – введення заходів для обмеження контакту людей та тварин з забрудненими ділянками ґрунту, наприклад будівництво бар'єрів або утримання ділянок у зоні відчуження [14-16].

Проблема протидії забрудненню ґрунтів, викликаному аварійними ситуаціями на атомних електростанціях, є особливо актуальною. Аварії на атомних електростанціях призводять до виходу великої кількості радіонуклідів у довкілля, що спричиняє інтенсивне забруднення значних територій.

За останній час людство стало свідком двох значних аварій на атомних електростанціях – аварії на Чорнобильській АЕС (ЧАЕС) та Fukushima Daiichi Nuclear Power Plant (FDNPP). Зазначені інциденти призвели до значного забруднення радіонуклідами довкілля, зокрема ґрунтів.

Так, внаслідок аварії на ЧАЕС забруднено понад 145 тисяч км² території, щільність забруднення ¹³⁷Cs сільськогосподарських ґрунтів у деяких регіонах сягала 15 Кі/км². У перші роки після аварії із сільськогосподарського обігу вилучено 101.2 тисяч га земель, розташованих у Київській (29.3 тисяч га) і Житомирській (71.9 тис. га)

областях [17]. Після аварії на FDNPP радіонуклідами було забруднено значну територію (8953 км²), переважно радіоцезієм та радіостронцієм [18].

Часто видалення верхнього шару забрудненого ґрунту є єдиним, але досить травматичним для природних екосистем методом зменшення радіаційного навантаження на ділянках з високою інтенсивністю забруднення. Проте цей підхід породжує проблему зберігання та ізоляції видаленого ґрунту з високим рівнем радіоактивності від навколишнього середовища. У зв'язку з цим особливо важливими стають методи очищення забруднених ґрунтів, які передбачають повернення знятого ґрунту у процесі рекультивації та обробку невеликих об'ємів радіоактивних відходів, які підлягають компактуванню та подальшому тривалому зберіганню. [19].

У представленому дослідженні розроблено та опрацьовано ефективний метод очищення та дезактивації радіоактивно забруднених ґрунтів, що стає важливим у контексті зменшення негативного впливу радіаційного забруднення внаслідок аварії на атомній електростанції на довкілля і здоров'я людей.

Такий підхід є важливим кроком у розв'язанні проблеми радіаційного забруднення ґрунтів і може мати значний практичний вплив на відновлення екосистем, зменшення радіаційного навантаження на довкілля та забезпечення безпеки і здоров'я населення.

Мета роботи – розробка та опрацювання нового ефективного методу дезактивації радіаційно забруднених ґрунтів для зменшення негативного впливу радіонуклідів на довкілля та здоров'я людини.

Об'єкт дослідження.

Для проведення досліджень було використано лабораторний зразок піщаного ґрунту, забруднений цезієм-137. Цей зразок імітує забруднений радіонуклідами поверхневий ґрунт зони відчуження Чорнобильської АЕС.

Зразок незабрудненого радіонуклідами ґрунту відібрано у Броварському районі Київської області. Мінеральний склад цього ґрунту містив аморфні та кристалічні форми кремнезему (кварц), кристали польових шпатів і глинистих мінералів (смектити, гідрослюди тощо).

Для отримання лабораторного зразка відібраний та висушений ґрунт просіяли крізь сито з розміром чарунки 5 мм. Просіаний ґрунт обробляли розчином азотнокислого цезію-137 протягом доби. Після фільтрування суспензії осадок висушували до повітряно-сухого стану за температури (70±5)°C.

Отриманий зразок витримували за кімнатної температури протягом 15 діб перед використанням для досліджень. Гамма-активність отриманого лабораторного зразка ґрунту становила 15500 Бк/кг.

Оцінку вмісту радіонуклідів у зразках провадили за допомогою гамма-спектрометрії. Вимірювання здійснювалися на спектрометрі Атолл-3М з використанням програмного забезпечення SPECTROLINE.

Дисперсію сорбенту на основі наночастинок гідроксиду заліза, модифікованих фероціанідами нікелюкалію, і дисперсію, що утворилася у результаті руйнування електродів, досліджували за застосуванням рентгенівської дифрактометрії (рентгенівський дифрактометр ДРОН-3М з використанням монохроматичного Cu-Kα випромінювання, параметри – U = 30

ENVIRONMENTAL ASPECTS
OF ENVIRONMENTAL RESTORATION:
A COMPLEX METHOD OF DEACTIVATION
OF RADIOACTIVELY CONTAMINATED SOIL

¹Zabulonov Yu.L., ¹Melnychenko T.I.,
¹Kadoshnikov V.M., ¹Kuzenko S.V.,
¹Odukalets L.A., ²Petrenko O.D.

¹SI «Institute of Environmental Geochemistry
of the National Academy of Sciences
of Ukraine», Kyiv, Ukraine

²SI «OM Marzieiev Institute for Public Health
of the National Academy of Sciences
of Ukraine», Kyiv, Ukraine

The purpose of the research: development of a new effective method of decontamination of radiation-contaminated soils to reduce the negative impact of radionuclides on the environment and human health.

Research materials and methods: The research object is sandy soil contaminated with radiocesium.

Research methods are applied: X-ray diffractometry, dispersion analysis, gamma spectrometry.

Results: A complex method for cleaning of radioactively contaminated soil is proposed, which combines plasma-chemical treatment of the «soil – water» suspension with subsequent separation of the cleaned soil and coagulation-sorption cleaning of the formed supernatant. The supernatant contains a dispersion in the aqueous phase of micro- and nanoparticles that contain radioactive substances. The principle of heterocoagulation was used for the deposition of the solid phase, which reduces the migration of radioactive particles into the dispersion medium, using a positively charged colloid

of iron hydroxide (III) as a coagulant. For deactivation of the liquid phase of the supernatant, a complex sorbent based on iron hydroxide micro- and nanoparticles modified with nickel-potassium ferrocyanides and highly dispersed layered aluminosilicates was used. At the same time, the degree of decontamination of the soil is 91.6%, and that of the supernatant is ~98%. This method allows to get purified soil that can be used in soil reclamation processes, as well as purified water. Multiple use of process water is envisaged, which prevents additional contamination of the environment with radioactive substances. Radioactive sludge is suitable for compaction and further storage in radioactive waste storage facilities.

Conclusions: Based on the results of this study, a new effective method of soil decontamination was developed and worked out, which is an effective and promising approach in combating the consequences of accidents at nuclear power plants and other sources of radiation pollution. It allows to effectively remove radioactive substances from soil and water, reducing the negative impact on the environment and human health.

The main advantages of the method are its high efficiency, the possibility of reusing process water, as well as reducing the amount of radioactive waste that requires further treatment and storage. The proposed approach is an important step in preserving ecosystems and ensuring the safety of life and health of the population.

Keywords: soil, radioactive contamination, deactivation, plasma chemical treatment, sorption, micro- and nanoparticles.

kV, I = 30 mA) за стандартною методикою [20].

Для детального аналізу гранулометричного складу зразків використано лазерний седиментограф Mastersizer 2000 з модулем рідинної дисперсії HydroS (Malvern Instruments, UK), принцип дії якого заснований на дифракції лазерного світла.

Для осадження дрібнодисперсної фракції після плазмохімічної обробки використовували колоїдний розчин гідроксиду заліза (III) [21]. Як спеціальний сорбент для видалення радіонуклідів, що концентруються у дрібнодисперс-

ній фракції ґрунту, використовували наночастинки гідроксиду заліза, модифіковані фероціанідами нікелю-калію [22]. Як додатковий сорбент для вилучення радіонуклідів, що концентруються у дрібнодисперсній фракції ґрунту, а також для прискорення осадження мікро- і наночастинок супернатанту застосовано бентоніт марки P4T2K (АОО «ДАШБЕНТ», Черкаська область), який перед застосуванням висушували за температури (120 ± 5)°C протягом 4 годин.

Для руйнування зв'язків радіонуклідів з ґрунтом використовували плазмохі-

мічний метод [23]. Використано пілотну установку, в якій реалізуються процеси, що відбуваються під час проходження високовольтного імпульсу крізь водну суспензію, що містить частинки радіоактивно забрудненого ґрунту [23].

Результати. Відомо, що ¹³⁷Cs міцно зв'язується з ґрунтом, зокрема з глинистими мінералами, переважно на шаруватих силікатах структурного типу 2 : 1 (сметити, гідрослюди), що призводить до концентрації радіоцезію у поверхневому шарі ґрунту [24, 25]. Також найбільш забрудненою виявляється дрібнодисперс-

на фракція ґрунту, що містить до 80% радіонуклідів. Однією з поширених технологій дезактивації є гідро сепарація, яка полягає у розділенні ґрунту на фракції та виділенні однієї з них – дрібнодисперсної (розміром частинок 5-150 мкм), де концентрується найбільша кількість радіонуклідів [26].

Виділена дрібнодисперсна фракція є сумішшю кварцу, глинистих мінералів, гідроксидів заліза та інших складових. Внаслідок застосування цієї технології об'єм радіоактивного забрудненого ґрунту зменшується у 5-6 разів. Для підвищення ефективності видалення частинок глини із ґрунту застосовано ультразвукову кавітацію та магнітну сепарацію. Процес відокремлення глини значно знижує рівень радіоактивності ґрунту – за даними дослідження, від 1630 Бк/кг до 222 Бк/кг за рахунок концентрування більшої частини ¹³⁷Cs у магнітній фракції [27]. Ефективність очищення ґрунту можна підвищити застосуванням плазмової гідросепарації у поєднанні з плазмовою активацією [23].

Ефект очищення забезпечується руйнуванням зв'язків радіонуклідів з частинками ґрунту за рахунок серії електрофізичних розрядів, під час яких виникають активні частинки та ударні хвилі.

Суть нашого дослідження полягала у розробці методу

ефективного очищення забрудненого ґрунту, у результаті чого утворюється невелика кількість радіоактивного шламу, придатного для компактування та подальшого зберігання.

Розроблений метод включає ряд етапів, а його особливістю є розділення процесу плазмохімічної обробки, під час якого відбувається десорбція радіонуклідів з частинок ґрунту, та процесу адсорбції радіонуклідів сорбентами з підвищеною селективністю. У результаті застосування запропонованого методу досягається високий ступінь очищення ґрунту, який можна використати у процесах рекультивациі, а отриману воду – у технологічних цілях. Загальну блок-схему розробленого методу очищення ґрунту від радіоактивного забруднення представлено на рисунку 1.

Зазначена схема передбачає попередню підготовку ґрунту, що включає суспензування шляхом змішування з підготовленою водою у співвідношенні 1 : 2, коригування рН до значення 2-3 за допомогою розчину сірчаної кислоти та подальшу обробку у плазмохімічному реакторі.

Під час проходження високовольтних розрядів через суспензію «ґрунт – вода» відбувається диспергування агрегатів ґрунту, десорбція радіонуклідів з поверхні частинок забрудненого ґрунту, що пояс-

нюється руйнуванням зв'язків радіонуклідів з мінеральною матрицею, та часткове руйнування органічних речовин.

Основними діючими факторами плазмохімічної обробки є поєднання гідравлічного удару, ультрафіолетового випромінювання, термічного впливу плазми, а також окислення речовин, які мають максимальну окислювальну здатність (атомарний кисень і водень, активні реакційно-здатні іони та радикали). Під час застосування електродів із сталі у плазмохімічному реакторі утворюються наночастинки металевого заліза та оксидів/гідроксидів заліза, які мають високу афінність (спорідненість) до іонів перехідних металів та стронцію [28].

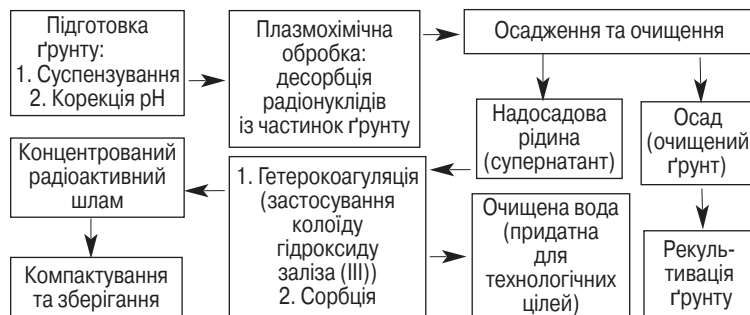
Відстоюванням суспензії після плазмохімічної обробки утворюється осад – очищений ґрунт, гамма-активність якого становить 1300 Бк/кг (ступінь дезактивації ґрунту – 91,6%), та надосадова рідина (супернатант). Промитий очищений ґрунт після додавання бентонітової глини може бути використаним для рекультивациі ґрунтів.

Супернатант є водною дисперсією, що включає рідку та тверду фази. У рідкій фазі концентруються розчинні форми радіонуклідів, які десорбовані із поверхні частинок ґрунту. Тверда фаза представлена мікро- та наночастинками ґрунту, на яких концентруються радіонукліди, а також мікро- та наночастинками заліза, його оксидів і гідроксидів, які утворилися за рахунок руйнування електродів.

Для осадження частинок твердої фази супернатанту з метою запобігання міграції радіонуклідів у дисперсійне середовище нами використано процес гетерокоагуляції. Враховуючи

Рисунк 1

Загальна блок-схема розробленого методу очищення ґрунту від радіоактивного забруднення



переважно від'ємний заряд частинок твердої фази супернатанту як коагулянта, доцільно використовувати колоїдний розчин, що містить позитивно заряджені частинки гідроксиду заліза (III) [21].

Вивчення гранулометричного складу та розподілу частинок за об'ємом показало, що колоїд гідроксиду заліза (III) є полідисперсним і складається переважно з частинок розміром <0.1 мкм та їхніх агрегатів. На рисунку 2 наведено диференційну криву розподілу частинок (за об'ємом) колоїду гідроксиду заліза (III), а у таблиці 1 представлено його гранулометричний склад.

У результаті взаємодії наночастинок колоїду гідроксиду заліза з високодисперсною твердою фазою супернатанту утворюються агломерати, які, втрапивши кінетичну стійкість, випадають в осад і можуть бути легко відокремленими від рідини, що очищується.

Для очищення водної фази супернатанту від водорозчинних іонів цезію нами використано спеціальний сорбент на основі наночастинок гідроксиду заліза, модифікованих фероціанідами нікелю-калію [22].

Сорбція іонів цезію, стронцію, кобальту, мангану наночастинками фероціанідів нікелю-калію зумовлена переважно іонним обміном катіонів дисперсійного середовища з іонообмінними центрами, локалізованими на зовнішній поверхні нанокристалу. Підвищена сорбція цезію, крім іонного обміну, пов'язана з включенням іонів цезію у структуру поверхневого шару нанокристалів фероціанідів, що зумовлено наявністю октаедричних порожнин у кристалічній ґратці фероціанідів нікелю-калію, в яких є молекули води, здатні до обміну з ка-

тіонами дисперсійного середовища.

Переважна сорбція цезію, порівняно з іншими катіонами, зумовлена низькою щільністю електричного заряду іона цезію [29]. Крім того, низька щільність електричного заряду іона цезію сприяє його міграції через дифузний шар іонів калію, локалізованих на поверхні наночастинок фероціанідів.

Гранулометричний склад зазначеного сорбенту визначено методом лазерного розсіювання і представлено у таблиці 2.

Розроблений сорбент є полідисперсним і містить частинки розміром від 1 мкм до 100 мкм.

Мінеральний склад сорбенту оцінено за допомо-

гою рентгенівської дифрактометрії (рис. 3).

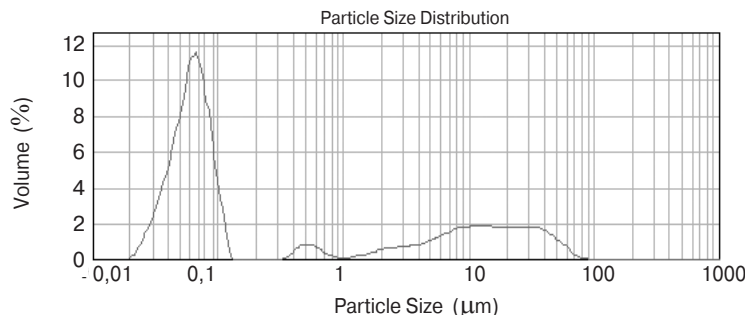
Сорбент складається переважно з аморфних частинок гідроксиду заліза $Fe(OH)_3$, а також нанокристалів – фероціанідів нікелю-калію (0.2953, 0.2519, 0.1712, 0.1704, 0.1609 нм), Fe_3O_4 (0.2822, 0.1996, 0.1712, 0.1704 нм), – $Fe_2O_3 \cdot H_2O$ (0.2705, 0.2091, 0.1996 нм), Fe_2O_3 (0.2705, 0.2519, 0.1996, 0.1712, 0.1704 нм), FeO (0.1604 нм) [30–33].

Підвищена афінність сорбенту до іонів цезію зумовлена присутністю нанокристалів фероціанідів нікелю-калію.

Експериментально встановлено, що очищення отриманого після плазмо-

Рисунок 2

Диференційна крива розподілу за об'ємом частинок колоїду гідроксиду заліза (III)



Таблиця 1

Гранулометричний склад колоїду гідроксиду заліза (III) (%)

Зразок	Фракції, мкм				
	<0.1	0.1-1	1-10	10-100	>100
Колоїд гідроксиду заліза (III)	60.93	6.48	12.15	20.44	0.00

Таблиця 2

Гранулометричний склад дисперсії наночастинок гідроксидів заліза, модифікованих фероціанідами нікелю-калію (%)

Зразок	Фракції, мкм				
	<0.1	0.1-1	1-10	10-100	>100
Дисперсія наночастинок гідроксидів заліза, модифікованих фероціанідами нікелю-калію	0.00	0.00	28.03	71.97	0.00

хімічної обробки радіоактивно забрудненого ґрунту супернатанту (гамма-активність ≈ 7000 Бк/дм³) дозволило отримати очищену воду, яка може бути використаною з технологічними цілями. Ступінь очищення супернатанту становить $\approx 98\%$.

Таким чином, нами запропоновано комплексний метод очищення радіоактивно забрудненого ґрунту, що об'єднує плазмохімічну обробку суспензії «ґрунт – вода» з подальшим відокремленням очищеного ґрунту та коагуляційно-сорбційне очищення утвореного супернатанту. Супернатант є дисперсією, тверда фаза якої представлена мікро- та наночастинками, на поверхні яких сконцентровані радіонукліди, а водна фаза містить радіонукліди у розчинній формі. Для осадження твердої фази використано принцип гетерокоагуляції, що перешкоджає міграції радіоактивних частинок у дисперсійне середовище, з використанням позитивно зарядженого колоїду гідро-

ксиду заліза (III) як коагулянта. Для дезактивації рідкої фази супернатанту використано комплексний сорбент на основі мікро- та наночастинок гідроксиду заліза (III), модифікованих фероціанідами нікелю-калію, та високодисперсні шаруваті алюмосилікати. Застосування цього методу дозволяє отримати очищений ґрунт, який можна використовувати у процесах рекультивативації ґрунтів, а також очищену воду.

Передбачається багаторазове використання технологічної води, що перешкоджає додатковому забрудненню доквілля радіоактивними речовинами. Радіоактивний шлам є придатним для компактування і подальшого безпечного зберігання у сховищах радіоактивних відходів. Ефективність та переваги запропонованого методу порівняно з іншими полягають у створенні умов для ефектної міграції радіоактивних частинок із ґрунту до водної фази, яку після очищення спеціальними сорбентами можна використо-

вувати з технологічними цілями, та для зменшення обсягу радіоактивного шламу, який придатний для компактування та подальшого тривалого зберігання.

Висновки

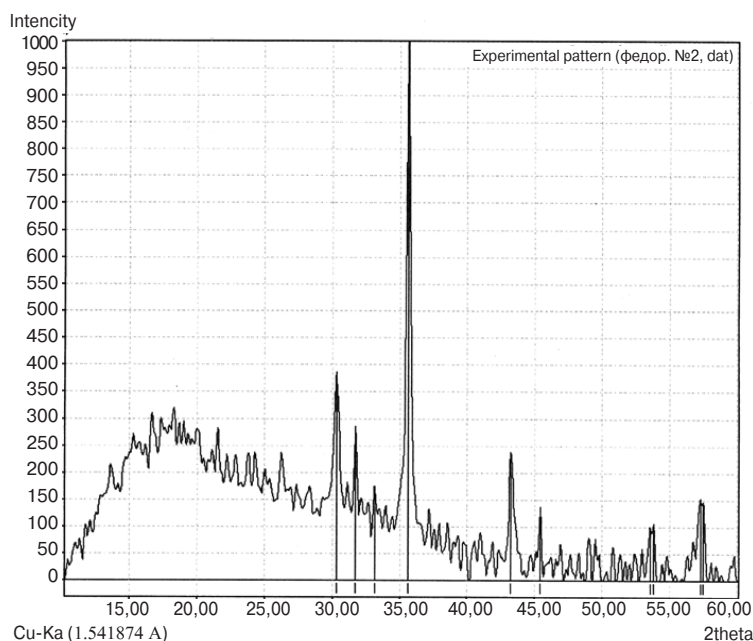
Аварії на атомних електростанціях є серйозною загрозою для довкілля та громадського здоров'я. Ліквідація їхніх наслідків є важливим завданням, яке вимагає значних зусиль та ресурсів.

За результатами даного дослідження розроблено та опрацьовано новий метод дезактивації радіоактивно забрудненого ґрунту, який є ефективним і перспективним підходом у боротьбі з наслідками аварій на атомних електростанціях та інших джерелах радіаційного забруднення. Він дозволяє ефективно видаляти радіоактивні речовини із ґрунту та води, зменшуючи негативний вплив на довкілля та здоров'я людей. Основні переваги методу полягають у його високій ефективності, можливості повторного використання технологічної води, а також у зменшенні обсягу радіоактивних відходів, які потребують подальшої обробки та зберігання. Даний підхід є важливим кроком у збереженні екосистем та забезпеченні безпеки життя та здоров'я населення.

REFERENCES

- Ostoich P, Beltcheva M, Antonio Heredia Rojas J, Metcheva R. Radionuclide contamination as a risk factor in terrestrial ecosystems: occurrence, biological risk, and strategies for remediation and detoxification. In : *The toxicity of environmental pollutants*. IntechOpen; 2022. <https://doi.org/10.5772/intechopen.104468>
- Shi Y, Zhao J, Ding B, Zhang Y, Li Z, MMAlI M, Siqin T, Zhao H et al. Multivariate statistical study on

Дифрактограма модифікованих фероціанідами нікелю-калію наночастинок гідроксиду заліза



- naturally occurring radioactive materials and radiation hazards in lakes around a Chinese petroleum industrial area. *Nuclear Engineering and Technology*. 2024 Feb. <https://doi.org/10.1016/j.net.2024.01.027>
3. Koua A, Michel H, Alabdullah J, Barci V, Aka HK, Barci-Funel G, Ardisson G. First measurements of anthropogenic and natural radionuclides in surface soils (10 cm) of Cote d'Ivoire. *Comptes Rendus Chimie*. 2009 Aug;12(8):850-3. <https://doi.org/10.1016/j.crci.2008.11.012>
4. Siraz MM, Rakib MD, Alam MS, Al Mahmud J, Rashid MB, Khandaker MU, Islam MS, Yeasmin S. Assessment of radionuclides from coal-fired brick kilns on the outskirts of Dhaka city and the consequent hazards on human health and the environment. *Nuclear Engineering and Technology*. 2023 August; 55 (8):2802-2811 <https://doi.org/10.1016/j.net.2023.04.045>
5. Ota M, Koarashi J. Contamination processes of tree components in Japanese forest ecosystems affected by the Fukushima Daiichi Nuclear Power Plant accident 137Cs fallout. *Science of the Total Environment*. 2022 Apr; 816:151587. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2021.151587>
6. Handbook of parameter values for the prediction of radionuclide transfer in terrestrial and freshwater environments. Vienna: International Atomic Energy Agency; 2010. 208 p. Technical reports series, № 472.
7. Handbook of parameter values for the prediction of radionuclide transfer to wildlife. Vienna: International Atomic Energy Agency; 2014. 229 p. Technical reports series, № 479.
8. Kozhakhonov TE, Lari-onova NV, Lukashenko SN, Baigazinov ZA, Kabdyrakova AM, Kunduzbayeva AY. Peculiarities in accumulation of radionuclides by fruit and berry trees and shrubs. *Journal of Environmental Radioactivity*. 2024 Jan; 271:107317. <https://doi.org/10.1016/j.jenvrad.2023.107317>
9. Tsukada H, Takeda A, Takahashi T, Fukutani S, Akashi M, Takahashi J, Uematsu S, Chyzhevskiy I, Kirieiev S, Kashparov V, Zheleznyak M. Transfer of ¹³⁷Cs and ⁹⁰Sr from soil-to-potato: Interpretation of the association from global fallout in Aomori to accidental release in Fukushima and Chernobyl. *Science of the Total Environment*. 2023 Jul:165467. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2023.165467>
10. Phuong HT, Ba VN, Thien BN, Truong Thi Hong L. Accumulation and distribution of nutrients, radionuclides and metals by roots, stems and leaves of plants. *Nuclear Engineering and Technology*. 2023 May. <https://doi.org/10.1016/j.net.2023.03.039>
11. Labunska I, Kashparov V, Levchuk S, Santillo D, Johnston P, Polishchuk S, Lazarev N, Khomutinin Y. Current radiological situation in areas of Ukraine contaminated by the Chernobyl accident: Part 1. Human dietary exposure to Caesium-137 and possible mitigation measures. *Environment International*. 2018 Aug; 117:250-9. <https://doi.org/10.1016/j.envint.2018.04.053>
12. 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 Jan; 146:106282. <https://doi.org/10.1016/j.envint.2020.106282>
13. Lavrinenko V, Shevchenko V. Vplyv radioaktyvnoho zabrudnennia na stan zdorovia naseleennia Chernihivskoi oblasti [The impact of radioactive contamination on the health of the population of Chernihiv region]. *Ecological Sciences*. 2022;(1):95-8. <https://doi.org/10.32846/2306-9716/2022.eco.1-40.17>. (Ukrainian).
14. Tsytsiura Ya, Shkatula Yu, Zabarna T, Pelekh L. Innovatsiini pidkhody do fitoremediatsii ta fitorekultyvatsii u suchasnykh systemakh zemlerobstva [Innovative approaches to phytoremediation and phytoremediation in modern farming systems]. Vinnytsia: Druk; 22. 1200 p. (Ukrainian).
15. Srinivasulu M, Narasimha G, Francis AJ. Cost effective technologies for solid waste and wastewater treatment. Elsevier; 2022. Chapter 3. *Bioremediation approach for treatment of soil contaminated with radiocesium*. P. 25-37. <https://doi.org/10.1016/b978-0-12-822933-0.00006-1>
16. Purkis JM, Bardos RP, Graham J, Cundy AB. Developing field-scale, gentle remediation options for nuclear sites contaminated with ¹³⁷Cs and ⁹⁰Sr: The role of Nature-Based Solutions. *Journal of Environmental Management*. 2022 Apr; 308:114620. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2022.114620>
17. Hrodzynskiy D, Dembnovetskyi O, Levchuk O. Perspektyvy vykorystannia ta utrymanna radiatsiino urazhenykh zemel [Perspectives of use and keeping of radiation damaged lands]. *Visnyk Natsionalnoi*

akademii nauk Ukrainy . 2003;(4):15-25. (Ukrainian).

18. Yasutaka T, Naito W. Assessing cost and effectiveness of radiation decontamination in Fukushima Prefecture, Japan. *Journal of Environmental Radioactivity*. 2016 Jan; 151:512-20. <https://doi.org/10.1016/j.jenvrad.2015.05.012>

19. Rääf C, Martinsson J, Eriksson M, Ewald J, Javid RG, Hjellström M, Isaksson M, Rasmussen J et al. Restoring areas after a radioactive fallout: a multidisciplinary study on decontamination. *Journal of Environmental Radioactivity*. 2023,Dec;270:107268. <https://doi.org/10.1016/j.jenvrad.2023.107268>

20. Horelik SS, Skakov YuA, Rastorguev LN. Rentgenografiya i elektronno-opticheskiy analiz [X-ray and Electron-Optical Analysis]. Moskva: MYSYS; 2002. 360 p. (Russian).

21. Zabulonov YL, Kadoshnikov VM, Melnychenko TI, Zadvernyuk HP, Kuzenko SV, Lytvynenko YV. Geochemical behavior of ferric hydroxide nanodispersion under the influence of weak magnetic fields. *Mineralogical Journal*. 2021;43(2):74-9. <https://doi.org/10.15407/mineraljournal.43.02.074>

22. Zabulonov Yu, Melnychenko T, Kadoshnikov V, Kuzenko S, Shkapenko V, inventors. Sposib oderzhannia nanodispersii kompleksnoho sorbentu dlia ochyshchennia tekhnogenno zabrudnenykh ta radioaktyvnykh vod [The Method of Obtaining a Nanodispersion of a Complex Sorbent for the Purification of Technogenically Polluted and Radioactive Waters]. Ukrainian patent 152730. 2023 Apr 5 (Ukrainian).

23. Petrov SV, Zabulonov YuL, Masato Homma. Study on plasma-stimulated remediation of radioactively contaminated soil.

In: *New approaches in engineering research*. Vol. 3. 2021: 103-15. <https://doi.org/10.9734/bpi/naer/v3/10209d>

24. Japan Atomic Energy Agency. Remediation of contaminated areas in the aftermath of the accident at the Fukushima Daiichi Nuclear Power Station; Overview, analysis and lessons learned, 2; Recent developments, supporting R&D and international discussions. Tokai-mura: 2015. 49 p. JAEA-Review 2014-052.

25. Nakao A, Ogasawara S, Sano O, Ito T, Yanai J. Radiocesium sorption in relation to clay mineralogy of paddy soils in Fukushima, Japan. *Science of the Total Environment*. 2014,Jan;468-469:523-9. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2013.08.062>

26. Varlakov AP, Germanov AV, Maryakhin MA, Varlakova GA. Tekhnologiya dezaktivatsii radioaktivno zagriaznennogo grunta [The technology of decontamination of radioactively contaminated soil]. *Analytics*. 2018; (1):46-50. <https://doi.org/10.22184/2227-572x.2018.38.1.46.50> (Russian).

27. Kim JH, Kim SM, Yoon IH, Yang HM, Kim I. Novel two-step process for remediation of Cs-contaminated soil assisted by magnetic composites. *Chemical Engineering Journal*. 2021, Nov;424:130554. <https://doi.org/10.1016/j.cej.2021.130554>

28. Zabulonov Y, Melnychenko T, Kadoshnikov V, Kuzenko S, Guzii S, Peer I. New sorbents and their application for deactivation of liquid radioactive waste. In:

Lecture notes in civil engineering. *Cham: Springer Nature Switzerland*; 2024: 126-36.

https://doi.org/10.1007/978-3-031-55068-3_14

29. Melnychenko T, Kadoshnikov V, Lytvynenko Y, Pysanska I, Zabulonov Y, Marysyk S, Krasnoholovets V. Nanodispersion of ferrocyanides for purification of man-made contaminated water containing caesium. *Journal of Environmental Radioactivity*. 2023 May; 261:107135.

<https://doi.org/10.1016/j.jenvrad.2023.107135>

30. Tananaev Y, Seifer H, Kharytonov Yu, Kuznetsov VH, Korolkov AP. Khimiya ferrotsianidov [Chemistry of ferrocyanide]. Moscow: Nauka; 1971. 315 p. (Russian).

31. Mykheev V. Renthenometrycheskiy opredelytel myneralov [X-ray mineral detector]. Moskva: Hosudarstvennoe nauchnotekhnicheskoe yzdatelstvo lyteratury po heolohyy y okhrane nedr; 1957. 868 p. (Russian).

32. Mirkin LY. Spravochnik po rentgenostrukturnomu analizu polikristallov [Handbook of X-ray diffraction analysis of polycrystals]. Moscow: HYFML; 1961. 863 p. (Russian).

33. Rakitskaya T, Truba A, Ennan A. Fazovyy sostav i kataliticheskaya aktivnost nanostrukturirovannykh materialov na osnove tverdoy sostavlyayushchey svarochnogo aerolya [Phase composition and catalytic activity of nanostructured materials based on the solid component of the welding aerosol]. *Voprosy khimii i khimicheskoy tekhnologii* [Issues of chemistry and chemical technology]. 2016; (1):29-34 (Russian).

Надійшло до редакції
04.04.2024