
ЗЕМЕЛЬНІ РЕСУРСИ І ҐРУНТИ

УДК 504

DOI <https://doi.org/10.32846/2306-9716/2024.eco.1-52.1.26>

ДОСЛІДЖЕННЯ ВЕРТИКАЛЬНОЇ СТРУКТУРИ ҐРУНТУ ЯК ЕЛЕМЕНТУ СИСТЕМИ ЗАХИСТУ НАВКОЛИШНЬОГО СЕРЕДОВИЩА ВІД РАДІАЦІЙНОГО ЗАБРУДНЕННЯ

Білоус М.А.¹, Микитась Д.О.¹, Гунько С.О.²,
Рець Ю.М.¹, Громова І.Ю.³, Куракова Н.О.^{3,4}

¹Державне підприємство «Бар'єр»
пр. Аношкіна, 179Б, 51938, м. Кам'янське

²Дніпровський національний університет імені Олеся Гончара
пр. Гагаріна, 72, 49010, м. Дніпро

³Державна екологічна академія післядипломної освіти та управління
вул. Митрополита Липківського, 35, корп. 2, 03035, м. Київ

⁴Державне спеціалізоване підприємство «Центральне підприємство
з поводження з радіоактивними відходами»
вул. Кірова, 52, 07270, м. Чорнобиль

beloys_mihail@ukr.net, dengv-sev@ukr.net, goonko@gmail.com,
smsgv1978@gmail.com, ema.dea@ukr.net

Розглянуті методи та результати первинних досліджень вертикальної структури ґрунту, зараженого радіаційним забрудненням. Дослідження та рекомендації щодо створення системи захисту навколишнього середовища виконані на прикладі колишнього ВО «Придніпровський хімічний завод». Вони стали проміжними в дослідженнях вертикальної структури забруднення ґрунтів та розробленні відповідної системи захисту навколишніх територій від радіаційного забруднення.

Підсумки проведених досліджень свідчать, що структура вертикального розподілу вмісту радіоактивних матеріалів на різних рівнях заглиблення в ґрунтах на території колишнього ВО «Придніпровський хімічний завод» на різних ділянках майданчика виокремлюється типом і характером формування забруднення. Зазначено, що за ознаками структури вертикального розподілу кількісних показників вмісту радіоактивних матеріалів можна виділити три основні типи формування забруднення: ділянки із забрудненням дисперсними матеріалами, що потрапили на поверхню ґрунтів шляхом переносу з повітряними масами (аерозолями), водними розчинами у разі проливання або шляхом безпосереднього потрапляння забруднених матеріалів на поверхню ґрунту; ділянки ґрунтів, де немає певних характерних закономірностей формування забруднення; ділянки, де, окрім присутності одного або двох вищезазначених типів забруднення, можуть спостерігатися захоронення будівельних конструкцій, забруднених фрагментів металобрухту та обладнання або залишки рудних матеріалів.

Зазначено, що неоднорідність структури вертикального забруднення радіоактивними матеріалами не дозволяє окреслити однозначно кореляційний зв'язок між ПЕД гамма-опромінення та вмістом ефективної активності гамма випромінюючих нуклідів або одного із найбільш характерних для спектру активності таких ґрунтів – Радію-226. Така залежність із досить високим коефіцієнтом кореляції ($R = 0,88-0,95$) спостерігається лише для секторів 1 і 2, а також на окремих ділянках колишньої зони розвантаження та тимчасового збереження уранових руд, де залишки уранової сировини, а відповідно – й найбільш забруднені поверхневі шари ґрунту. На таких ділянках, використовуючи результати кореляційного аналізу просторового розподілу потужності експозиційної дози (ПЕД) гамма-випромінювання, в майбутньому стане можливим виконання оцінки об'ємів забруднених ґрунтів і радіоактивних матеріалів. *Ключові слова:* ґрунт, вертикальна структура, проби, потужність кореляційний аналіз, гамма-випромінювання.

Study of the vertical structure of soils as an element of the environmental protection system against radiation contamination. Bilous M., Mykytas D., Hunko S., Rets Yu., Gromova I., Kurakova N.

This article examines the methods and results of primary research into the vertical structure of radiation contamination soils. Research and recommendations on the creation of an environmental protection system were carried out on the example of the former "Prydniprovsky Chemical Plant".

The methods and research results described in the work became an intermediate stage of work on the study of the vertical structure of soil contamination and the development of an appropriate system for protecting the surrounding territories from radiation contamination.

The results of the research show that the structure of the vertical distribution of the content of radioactive materials at different levels of submersion in the soil on the territory of the former "Pridniprovskiy chemical plant" in different areas of the site is determined by the type and nature of the formation of contamination. It was determined that, based on the structure of the vertical distribution of quantitative indicators of the content of radioactive materials, three main types of contamination can be distinguished: areas with the type of contamination by dispersed materials that have reached the soil surface by transport with air masses (aerosols), aqueous

solutions in the event of a spill or by direct contamination of the soil surface; areas of soil where there are no specific patterns of pollution formation; areas where, in addition to the presence of one or two of the above-mentioned types of pollution, the burial of building structures, contaminated fragments of scrap metal and equipment, or the remains of ore materials can be observed.

It was determined that the heterogeneity of the structure of vertical contamination by radioactive materials does not allow to reveal an unambiguous correlation between the EDR of gamma irradiation and the content of the effective activity of gamma-emitting nuclides or one of the most characteristic for the activity spectrum of such soils – Radium-226. Such a dependence with a fairly high correlation coefficient ($R = 0.88-0.95$) was found only for sectors 1 and 2, as well as some areas of the former zone of unloading and temporary storage of uranium ores, where the remains of uranium raw materials and, accordingly, are the most contaminated surface layers of the soil. In such areas, using the results of the correlation analysis of the spatial distribution of the exposure dose (EDR) of gamma radiation, it is possible to perform an assessment of the volumes of contaminated soils and radioactive materials in the future. *Key words*: soil, vertical structure, samples, power correlation analysis, gamma radiation.

Актуальність теми. Інтенсивний розвиток атомної енергетики, широке застосування радіонуклідів у промисловості, медицині та наукових дослідженнях визначає актуальність питань, пов'язаних із вивченням шкідливої дії радіонуклідів на біосферу та їх розповсюдження у природних середовищах. Шляхи міграції радіонуклідів у екосистемах доволі складні. Отже, рухомість радіонуклідів у ґрунтах залежить від низки чинників, найбільш важливими з яких – фізико-хімічні властивості самих радіонуклідів та їх форми, тип ґрунту та кліматичні фактори.

Понад 30 років з часу розформування колишнього ВО «Придніпровський хімічний завод» у місті Кам'янське відбувалися процеси відкладення, проникнення та накопичення забруднюючих речовин на території цього підприємства. Небезпечність таких процесів обумовлена високим ризиком радіаційного ураження предметів та живих організмів. У свою чергу, такого ризику набуває й ґрунт, що є субстратом для рослин, а відповідно і джерелом накопичення та поширення радіоактивних речовин у навколишньому середовищі серед живих організмів.

Мета даної праці – дослідити просторовий та вертикальний розподіл ПЕД гамма-випромінювання ґрунтів, уражених радіоактивними речовинами та розробити рекомендації щодо створення системи захисту навколишнього природного середовища від радіаційного забруднення (на прикладі території колишнього ВО «Придніпровський хімічний завод» у м. Кам'янське).

Об'єкт дослідження: вертикальна структура ґрунту, забрудненого радіонуклідами.

Предмет дослідження: результати вимірювань гамма-випромінювання ґрунтів.

Постановка проблеми. Основна мета захисту ґрунту від радіонуклідів – обмежити їх надходження до рослин, що є першою ланкою в трофічному ланцюзі на шляху до людини. Єдиний спосіб захистити ґрунт під час випадання радіоактивних опадів з атмосфери – накрити його полімерною плівкою або покрити поверхню ґрунту непроникним субстратом. Звичайно, здійснити це можна лише в невеликих масштабах. Однак після випадіння радіоактивних опадів можна вжити заходів, щоб запобігти транспортуванню радіоактивних речовин на земну поверхню та у ґрунтового профілі, тобто обмежити їх поширення як латерально, так і радіально, а отже,

захистити незабруднені або менш забруднені території. Рельєф місцевості та деякі ландшафтно-географічні особливості регіону відіграють важливу роль у дифузії радіоактивних речовин у навколишнє природне середовище, зокрема, їх проникнення в рослини. Вони можуть посилювати як горизонтальну, так і вертикальну рухливість радіонуклідів і таким чином впливати на їх переміщення у рослинах [2].

Поглинання радіонуклідів рослинами та їхнє подальше потрапляння в організм людини харчовою системою є одним з основних шляхів її внутрішнього опромінення. Дане дослідження [7] здійснене з метою з'ясування вмісту природних радіонуклідів ^{238}U та ^{232}Th у ґрунті рисових полів Езілло (поле 1 та поле 2) на глибині 0–4 см та 4–8 см, їх перенесення та накопичення у зернах рису. Середні концентрації обох радіонуклідів у ґрунті за ознакою перевищували середньосвітові оцінки, тоді як для рису значення $11,7 \pm 4,3$ та $3,0 \pm 1,3$ Бк/кг на полі 1 та $8,5 \pm 4,2$ та $4,3 \pm 1,6$ Бк/кг на полі 2 для ^{238}U і ^{232}Th відповідно, мали значення нижчі за середньосвітові показники. Коефіцієнти перенесення радіонуклідів (КП) на обох глибинах коливалися від 0,03 до 0,67 та від 0,01 до 1,20 для ^{238}U та ^{232}Th відповідно. Загальні середні геометричні та стандартні відхилення, оцінені на полі 1, склали відповідно 0,22 і 1,52 для ^{238}U і 0,18 і 4,21 для ^{232}Th (ґрунт, 0–4 см); 0,43 і 1,80 для ^{238}U і 0,18 і 3,79 для ^{232}Th (ґрунт, 4–8 см), тоді як на полі 2 значення були відповідно 0,12 і 2,62 для ^{238}U і 0,06 і 4,15 для ^{232}Th (ґрунт, 0–4 см); 0,11 і 1,85 для ^{238}U і 0,12 і 4,15 для ^{232}Th (ґрунт, 4–8 см). Концентрації нуклідів у рисі знаходяться у межах значень, поширених у літературних джерелах. Результати даного дослідження засвідчили відсутність міграції радіонуклідів у системі ґрунт-рослина.

Як продовження вивчення транспортування радіонуклідів трофічними ланцюгами, варто розглянути роботу вчених Косово [10]. Метою їх дослідження стало визначення рівнів радіонуклідів (^{40}K , ^{226}Ra і ^{232}Th), що зустрічаються в природі, і штучного радіонукліду ^{137}Cs в різних зразках меду з Косова. Середні концентрації радіонуклідів ^{226}Ra , ^{232}Th , ^{137}Cs і ^{40}K у пробах меду склали $0,49 \pm 0,15$, $1,28 \pm 0,18$, $1,03 \pm 0,11$ та $20,44 \pm 0,69$ Бк/кг відповідно. Значення активності ^{137}Cs , виявлений у зразках меду, був значно нижчим від граничного значення (1000 Бк/кг), рекомендованого для харчових продук-

тів. Дослідження підтвердили, що мед, вироблений у Косові, задовільної якості та відповідає міжнародним стандартам за концентрацією радіоактивності.

Не менш інформативним, разом із вивченням радіоактивного забруднення ґрунтів і рослин, є дослідження радіоактивності геологічних матеріалів [5]. Концентрації радіоактивності ^{226}Ra , ^{232}Th і ^{40}K у деяких виробних каменях у Єгипті були виміряні за допомогою гамма-спектрометра високої роздільної здатності. Для оцінки радіаційної небезпеки також були визначені вміст природних радіонуклідів, еквівалентна активність та різні індекси небезпеки. З'ясувалося, що жоден із результатів не перевищує рекомендованого граничного значення. Всі досліджувані зразки за рівнем забруднення – в допустимих межах та не мають значної радіаційної небезпеки.

Відомо [11], що забруднені ґрунти лісових біогеоценозів на тривалий час стають резервуаром радіонуклідів, визначаючи їх міграцію в системі «ґрунт–рослина». Рухомість радіонуклідів у ґрунтового профілі істотно впливає також на масштаби їх проникнення в ґрунтові води.

Підвищена кількість опадів, численні водойми, високий рівень ґрунтових вод та загроза підтоплення ґрунту під час весняних паводків, літніх й осінніх дощів збільшують латеральне та радіальне переміщення радіонуклідів.

В автоморфних ґрунтах розповсюдження радіонуклідів близьке до ґрунтів лісових ділянок, але з більш інтенсивним спадом їх вмісту за профілем. Найбільше заглиблення абсолютного максимуму вмісту радіонуклідів і значна розмитість їх профільного розповсюдження спостерігається в алювіальних луко-болотних ґрунтах. Найбільшою інтенсивністю міграції радіонуклідів означені гідроморфні ґрунти, а найменшою – пойменні, не зважаючи на їх важкий гранулометричний стан, за ними, у спадаючому порядку, – автоморфні лісові ґрунти.

Інтенсивність міграції радіонуклідів у ґрунті прямо пов'язана з мобільністю їх різних форм у природних умовах. Як демонструють дослідження [8], відносний вміст рухомих форм радіонуклідів у верхньому 0–5 см шарі ґрунту, як правило, значно нижче такого в шарі 5–10 см. Це скоріш за все обумовлено переважанням у цьому шарі слабозрчинних частинок випадіння. Таким чином, не дивлячись на значну різницю в загальному запасі радіонуклідів, уміст їх рухомих форм у обох шарах коректний для порівняння.

Вміст рухомих радіонуклідів мінімальний в алювіальному луко-болотному ґрунті, що вочевидь викликано його фіксацією глинистими мінералами. В той же час, гідроморфний торф'янистий ґрунт уміщує найбільший відсоток рухомих форм радіонуклідів, що, швидше за все, обумовлено зниженою необмінною їх фіксацією в торф'яних горизонтах і підвищеною мобільністю низькомолекулярних радіонуклід-органічних сполук у даних ґрунтах.

У лізиметричних водах доля радіонуклідів помітно підвищується з глибиною, що викликано, ймовірно, підвищеною рухомістю їх специфічних форм у рідкій фазі ґрунтів. Так відомо, що катіони стронцію можуть утворювати рухомі радіонуклід-органічні сполуки в ґрунті, а рутеній в природних умовах здатний до утворення рухомих форм тільки в складі комплексних аніонів [12]. Подібні сполуки слабо сорбуються ґрунтами та можуть мігрувати в складі істинних і колоїдних розчинів. Невідповідність між радіонуклідним складом ґрунтового профілю та внутрішньо-ґрунтового стоку свідчить про наявність різних механізмів міграції в ґрунті основної маси радіонуклідів та їх легкорухомих форм.

Вищенаведені дані підтверджують висновок, що інтенсивність перерозподілу радіонуклідів у ґрунтового профілі та внесок окремих міграційних процесів у загальний кінцевий розподіл радіонуклідів у профілі ґрунтів неоднаковий.

Викладення основного матеріалу. Моніторинг та своєчасна модернізація підприємств уранового виробництва є першочерговим завданням, не менш важливим є питання щодо відновлення та захисту колишніх уранових об'єктів.

Так, у 2021 році Міжнародне агентство з атомної енергії (МАГАТЕ) провело онлайн щорічну нараду Координаційної групи з представниками колишніх уранових об'єктів (КГКУО) для продовження обміну інформацією та координації майбутньої діяльності держав-членів і міжнародних організацій, що беруть участь у КГКУО [1]. Уряд України, як країни-члена МАГАТЕ, зацікавлений у роботі цієї Координаційної групи з огляду на наявність об'єктів, що можуть підлягати її моніторингу.

Як відомо, на території України одним з найбільш значних колишніх уранових об'єктів є виробничий комплекс колишнього ВО «Придніпровський хімічний завод». Протягом своєї активної виробничої діяльності, що тривала з 1948 року по 1991 рік, підприємство було одним з найпотужніших у сфері переробки уранових руд колишнього Радянського Союзу. Оскільки на цьому підприємстві перероблялося більше 60% від всіх уранових руд СРСР, то на виробництво спрямовувалося чимало ураномістних порід як з вітчизняних родовищ (наприклад, м. Жовті Води, а також з Дніпропетровської, Кіровоградської та Миколаївської областей), так і закордонних (Казахстану, Чехії та Німеччини) [2].

Крім того, на базі ВО «Придніпровський хімічний завод» здійснювалася переробка цирконієвих руд, виробництво гафнію, іонообмінних смол, мінеральних добрив та інше. Чимало відходів (хвости) уранового виробництва накопичувалися у хвостосховищах на майданчику та прилеглих територіях. Із припиненням робіт на підприємстві, необхідні заходи щодо виведення його із експлуатації та очистки об'єктів інфраструктури уранового виробни-

цтва не здійснювалася, поступово руйнувалися елементи виробничої інфраструктури та захисні покриття хвостосховищ [4].

На території заводу знаходяться будівлі та споруди, що використовувалися для переробки уранових руд, потужність дози гамма-випромінювання в них становить до 520 мкР/год, об'ємна активність радону в повітрі – понад 200 Бк/м³. Прилегла до будівель територія (250 тис. м²) забруднена радіонуклідами, потужністю дози гамма-випромінювання до 1 мкР/год [3].

Зазначені об'єкти (в минулому ВО «Придніпровський хімічний завод») формують стійкі забруднювачі навколишнього середовища та є джерелами опромінення не тільки персоналу, а й населення, яке мешкає на прилеглих до них територіях, рівні якого перевищують встановлену НРБУ-97 квоту рівня дози для референтного радіаційно-небезпечного об'єкта – 80 мкЗв [2].

На попередніх стадіях досліджень ситуації з радіоактивним забрудненням території колишнього промислового майданчика ВО «Придніпровський хімічний завод», проведених у 2010–2013 роках, за результатами доопрацювань у рамках проєкту ЕС INSC Project U4.01/10G, Укр ГМП створив просторову карту розподілу потужності еквівалентної дози гамма-випромінювання (ПЕД) та визначив основні зони забруднення з точки зору впливу гамма-випромінювання. Результати підтвердили, що регіон можна розділити на дві частини (північний і південний сектори) на основі характерних рівнів забруднення [4].

Подібні дослідження – перспективні та досить актуальні. Так, турецькі вчені у своїй праці з оцінки та картування радіонуклідів у наземному середовищі застосували подібні методики інтерпретації та аналізу даних. Метою дослідження була радіологічна характеристика верхнього шару ґрунту в Артвінському районі, оцінка відповідних ризиків для здоров'я та отримання розподілу радіологічних параметрів у ґрунті регіону за допомогою геостатистичного методу. Середні значення концентрацій радіонуклідів ²²⁶Ra, ²³²Th, ⁴⁰K та ¹³⁷Cs у 117 пробах ґрунту визначені гамма-спектрометричним аналізом і становили: 42,26; 27,57; 390,42 та 14,87 Бк/кг відповідно. За отриманими результатами визначали еквівалентну активність радію ($R_{\text{аек}}$), репрезентативний рівень гамма-випромінювання дорівнювали 111,75 Бк/кг, 0,41; 0,30 і 0,81 відповідно для регіону. Крім того, середня потужність поглиненої дози, еквівалент річної ефективної дози та надмірний ризик захворювання мешканців раком протягом життя були розраховані як 54,79 нГр/год, 0,067 мЗв/год та 0,00023 відповідно для провінції. Було встановлено, що всі радіологічні параметри, отримані для регіону, мали значення нижчі за середньосвітові. Оцінки активності для точок, що не були враховані під час дослідження, та визначити розподіл радіації, інтер-

поляції для кожного радіонукліду були виконані за допомогою звичайного методу кригінгу; карти просторового розподілу створювалися з використанням таких оцінок. Результати проведених досліджень продемонстрували, що розподіл радіонуклідів по регіону цілком узгоджується з розрахунковими потужностями доз [6, 9].

Отже, дослідження засвідчили, що у північній частині сектору території колишнього промислового майданчика ВО «Придніпровський хімічний завод» забруднення ґрунтів в основному пов'язане з повітряним рухом і є досить низьким. З іншого боку, в південній частині сектору, де розташовані всі основні об'єкти колишнього уранового виробництва, елементи інфраструктури та ставки для захоронення відходів уранового виробництва, забруднення ґрунту, пов'язане із захороненням відходів уранового виробництва, відносно високе. Понад третина площі південного сектора колишнього ВО «Придніпровський хімічний завод» має підвищені значення потужності еквівалентної дози гамма-випромінювання (ПЕД) (від 0,5 до 30 мкЗв/год). Забруднення території зумовлене, головним чином, високим вмістом у ґрунті залишків руди та відходів виробництва, що мають високі рівні радію-226 і торію-230, у десятки-сотні разів перевищують критерій вилучення для нормативного контролю уран-торієвих радіонуклідів (1 Бк/грам). Основними об'єктами концентрованого накопичення радіоактивних відходів уранового виробництва в південній частині області є радіоактивні відходи уранового виробництва, накопичені у сховищах «Західне», «Центральний Яр» та «Південно-Східне». Захисне покриття цих сховищ не відповідає міжнародним стандартам [3, 4].

Атмосферні води та повітря, що потрапляють у тіло сховищ, сприяють їх окисленню та вимиванню урану та інших токсичних забруднювачів у ґрунтові води. Тому дослідження вертикальної структури забруднення ґрунту у зв'язку з розробкою стратегії подальшого поводження з ґрунтом та радіоактивними матеріалами на цій території, а також проєктування заходів радіаційного захисту і дезактивації в рамках програми реабілітації території, є актуальними і пріоритетними цілями для подальших досліджень.

Стратегія повернення майданчика до безпечного стану передбачає його реабілітацію після демонтажу та вивезення всіх основних концентрованих джерел іонізуючого випромінювання (великих забруднених будівель та інших об'єктів колишньої інфраструктури уранового виробництва, РЗМ). Плани реабілітації колишнього уранового виробництва передбачали видалення забруднених ґрунтів, що містять уран-торієві радіонукліди з рівнями активності понад 1–2 Бк/г або ПЕД гамма-випромінювання понад 5 мкЗв/год, та їх захоронення за межами майданчика, зокрема, переміщення до басейну захоронення відходів «Сухачівське-2» або до інших підготовлених

майданчиків для довгострокового та безпечного зберігання.

На стадії скринінгу обсяги забрудненого ґрунту, що потенційно може бути вивезений за межі майданчика, були визначені для середнього шару вертикального забруднення ґрунту до глибини 0,5 м. Проте такий підхід дозволив лише не повною мірою визначити обсяги забрудненого ґрунту, який необхідно вивезти за межі майданчика, що можуть досягати десятків тисяч кубометрів, в тому числі й щодо вартості таких послуг. Тому було прийнято рішення продовжити дослідження структури забруднення ґрунту колишнього майданчика ВО «Придніпровський хімічний завод» радіоактивними матеріалами з детальним вивченням вертикальної структури забруднення шарів ґрунту, що містять уран-торієві радіонукліди та інші можливі джерела іонізуючого випромінювання (гірничі матеріали і концентрати, металеві відходи, будівельні конструкції тощо) в рамках даного контракту [4].

Методика відбору проб ґрунту та рудомістких матеріалів. Польові роботи з визначення забруднення вертикальної структури проводилися відповідно до згідно розробленої методології та програми польових досліджень.

Під час виконання таких робіт працівникам або дослідникам незалежних установ необхідно керуватися чинниками відповідно до інструкцій щодо проведення польових робіт. Обладнання для відбору проб ґрунтів – інструменти ручного буріння, тести, каротажна станція, тощо. Безпосередньо на місцевості було обрано ділянки і точки для подальшого скринінгового аналізу. Визначення місця відбору проб ґрунту здійснювалося на підставі завчасно створеної карти просторового розподілення потужності дози гамма-випромінювання. Для відбору ґрунтових колонок територія обраного сектору майданчика була розділена на окремі ділянки в залежності від рівня ПЕД гамма-випромінювання [4].

З огляду на означені операції, під час проведення досліджень польові роботи виконані протягом однієї стадії до глибини 1 м. На першому етапі проводився відбір характерних колонок ґрунту (не менше 5 колонок) для кожної із ділянок, що були визначені в якості характерних для подальшого детального дослідження.

Первинна обробка і підготовка проб до аналізу. Тестові зразки готували до аналізу у відділі радіаційного моніторингу навколишнього природного середовища УкрНДГМП [4].

Процедури підготовки проб ґрунту для аналізу містить наступні операції:

1. Контейнери з відкритими кришками ставили на ніч у морозильну камеру.

2. Після замерзання проб контейнери ставили на 2 доби в Ліофілізатор Labconco 4.5L і методом ліофільного сушіння у вакуумному середовищі, висували проби до повітряно-сухого стану.

3. Контейнери зважували на технічних вагах, розраховували об'ємну вагу сухого матеріалу і відносну вологість.

4. Висушений матеріал ретельно перемішували у контейнері за допомогою скляної палички, рівномірно утрамбовували, вимірювали товщину шару у контейнері, закривали герметично кришкою і направляли на гамма-спектрометричний аналіз.

Результати аналітичних досліджень. За результатами виконаних аналітичних вимірювань розроблена програма необхідних детальних додаткових обстежень території на тих ділянках, де забруднення неоднорідне або має не типові характеристики забруднення (заглиблені металеві конструкції, що потребують видалення, ділянки, що мають проміжне покриття із високими рівнями забруднення, або ділянки із глибоким шаром (більше 0,5–1,5 м) вмісту забруднення і потребують спеціальних методів інвентаризації, а також планування детального відбору колонок на ділянках неоднорідного забруднення, що мають відображати всі зони із підвищеним рівнем ПЕД гамма-опромінювання вище 0,5 мкЗв/год.

За необхідності на деяких ділянках проби відбиралися до глибини 1 м методом ручного геологічного буріння або ж шурфування для ідентифікації розташування забруднених шарів ґрунту методом гамма-каротажу.

На рисунках 1, 2 та 3 показано точки відбору ґрунтових проб на тестовому полігоні в секторі 1, 2 та 3 відповідно.



Рис. 1. Результати просторового і вертикального розподілу ПЕД гаммаопромінювання на території тестового полігону у секторі 1 (на зеленому полі вказані дані ПЕД гамма-опромінювання мкЗв/год, відстань між точками 5 м)

Вивчення ізотопного складу на різних глибинах забруднених ґрунтів (вертикальної структури), дозволило виділити такі типи забруднення:

1) рудне (радіонукліди сімейства урану-238, кількісні характеристики активності яких у ґрунтах зна-

ходяться у рівновазі), визначено у межах секторів 1 і 2 (колишні ділянки розвантаження уранової руди);

2) залишки переробки уранових руд (де спостерігається порушення стану радіоактивної рівноваги між материнськими і дочірніми радіонуклідами, в матеріалах переважають радіонукліди радію-226 або торію-230 (у деяких ідентифіковано суміші ґрунтів і забруднених матеріалів залишків уранового виробництва із відносно рівноважною активністю радію-226 і свинця-210, або із явно вираженими домінуванням активністю торію-230, радію-226 або свинцю-210);

3) залишки готової продукції (переважно суміші ґрунту і концентратів урану).

Аналізуючи отримані дані для Сектора 1, Сектора 2, Сектора 3 можна розташувати у такий ряд зі зменшенням рівню забруднення, який наведено у таблиці 1.

Отже, підсумовуючі отримані дані, виділені сектора можна розташувати у такий ряд зі зменшенням за рівнем забруднення: Сектор 1 > Сектор 3 > Сектор 2.

Неоднорідність структури вертикального забруднення радіоактивними матеріалами не дозволяє виявити однозначно кореляційний зв'язок між ПЕД гамма-опромінення і вмістом ефективної активності гамма випромінюючих нуклідів або одного із найбільш характерних для спектру активності таких ґрунтів – Радію-226. Таку залежність із досить високим коефіцієнтом кореляції ($R = 0,88-0,95$) виявлено лише для секторів 1 і 2, а також деяких ділянках колишньої зони розвантаження і тимчасового збереження уранових руд, де залишки уранової сировини, а відповідно і найбільш забрудненими є поверхневі шари ґрунту. На таких ділянках, використовуючи результати кореляційного аналізу ПЕД гамма-опромінення просторового розподілу, можуть бути виконані оцінки об'ємів забруднених ґрунтів та радіоактивних матеріалів.

На ділянках, де не знайдено вираженого кореляційного зв'язку між вмістом і глибиною основного шару радіоактивного забруднення, варто провести додаткові дослідження з метою визначення основних розмірів просторового заглиблення радіоактивних матеріалів з метою зменшення невизначених показників в оцінках об'ємів і кількісних характеристик радіоактивних матеріалів у ґрунтах.

В структурі вертикального забруднення ґрунтів виявлені шари із високим вмістом токсичних мета-

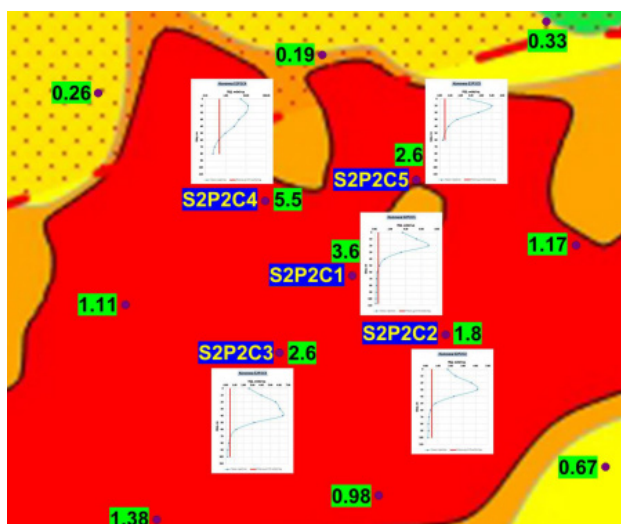


Рис. 2. Результати просторового і вертикального розподілу ПЕД гаммаопромінення на території тестового полігону у секторі 2 (на зеленому полі вказані дані ПЕД гамма-опромінення мкЗв/год, відстань між точками 5 м)

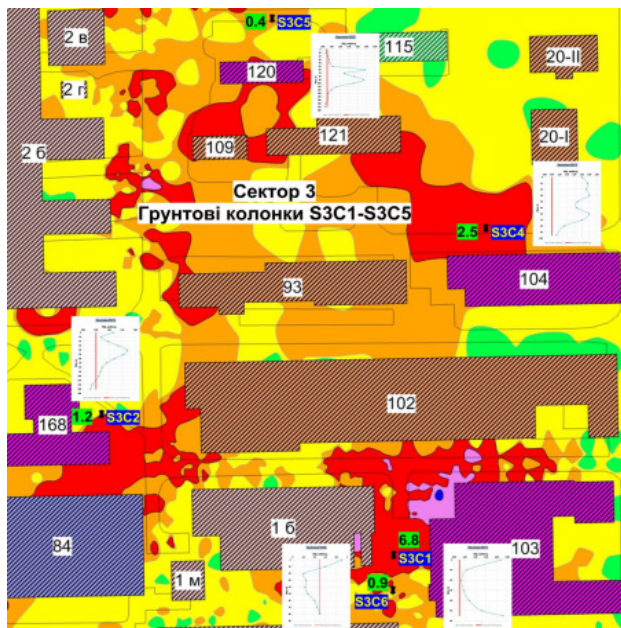


Рис. 3. Результати просторового і вертикального розподілу ПЕД гамма-опромінення на території сектору 3 (на зеленому полі вказані дані ПЕД гамма-опромінення мкЗв/год)

Таблиця 1

Загальна характеристика структури радіоактивного забруднення у виділених Секторах

Шифр колонки	Глибина забруднення, см	ПЕД, мкЗв/год	Активність Бк/г				Тип забруднення	Шар максимального забруднення
			U	Th	Ra	Pb		
Сектор 1	20-80	4,9-36,8	4,6-41,8	4,2-67,0	3,3-77,2	2,3-42,2	рудне	Макс – 0,0–0,7 м
Сектор 3	0-100-160	0,4-4,7	0,2-3,9	0,3-38,7	0,13-20,2	0,14-18,3	залишки різних технологічних процесів	Макс - 0,2–0,6 м Макс - 0,8–1,0 м
Сектор 2	5-40	1,2-12,6	1,1-9,8	1,1-8,5	1,3-9,6	0,9-5,5	рудне	Макс - 0–0,4 м

лів. Підвищені рівні токсичних матеріалів у більшості випадків мають високу кореляцію із рівнями радіоактивного забруднення. Це свідчить про те, що причини хімічного забруднення ґрунтів на майданчику мають ті ж чинники, що і забруднення радіоактивними матеріалами рудного походження.

На обраних ділянках із характерними типами радіоактивного забруднення, де виявлені значні неоднорідності забруднення, мають бути проведено додаткові роботи із більш глибоким аналізом шарів забруднення, а також на тих ділянках, де виявлено аномалії за типом формування забруднення або на ділянках де виявлено значні джерела радіоактивного забруднення заглиблені під шаром відносно чистого ґрунту. Це дозволить більш повніше визначити просторовий розподіл радіоактивних матеріалів на майданчику та очікувані обсяги забруднених матеріалів на стадії розроблення стратегії поводження із забрудненими ґрунтами та матеріалами на майданчику. Необхідно розробити методи оцінки характеристик джерел радіоактивного забруднення, заглиблених, під шаром чистих ґрунтів у вигляді забруднених залишків будівельних конструкції, металобрухту, забрудненого обладнання і рудних матеріалів.

За підсумками польових робіт, здійснених у 2016 році, а також уточнень результатів польових досліджень і аналітичних робіт у 2017 році було визначено концептуальну модель для тривимірної оцінки характеристик просторового розподілу тіла забруднених ґрунтів і матеріалів для характерних зон забруднення і оцінити очікувані об'єми забруднених матеріалів, як основи для обґрунтування стратегії поводження із такими матеріалами [4].

За результатами досліджень, проведених у 2016–2017 роках, означені ділянки території, що

потребують локальної дезактивації. Узагальнення отриманих результатів дозволило сформулювати уточнені карти найбільш забруднених ділянок навколо об'єктів спадщини уранового виробництва, а також надати рекомендації щодо пріоритетів та першочергового очищення території майданчика. Результати, наведені у заключному звіті, мають бути внесені у відповідні кластери інформації розробленої інформаційної системи та паспорти території колишнього ВО «Придніпровський хімічний завод» [4].

Основні висновки. 1. Визначено, що захист ґрунтів є одним з найважливіших і перспективних напрямків у створенні системи захисту навколишнього природного середовища. Підтверджено, що ґрунт, уражений радіонуклідами, – це джерело живлення для рослин, які отримують радіаційне ураження, що призводить до проникнення забруднюючих речовин як в окремі фітоценози, так і розлогі біогеоценози.

2. Проведення вертикального аналізу структури ґрунтів, уражених радіоактивними забруднюючими речовинами дозволило визначити різноманітний склад і походження досліджених ділянок ґрунтового покриву промислової території колишнього ВО «Придніпровський хімічний завод». Подальший аналіз різноманітного складу ґрунтового покриву дозволить розробити конкретний план заходів щодо рекультивації забруднених ділянок.

3. Отримані аналітичні і статистичні данні дозволили надати рекомендації щодо проведення подальших досліджень, які дозволять розробити план заходів із захисту навколишнього природного середовища від радіаційного забруднення.

Література

1. Річний звіт МАГАТЕ за 2021 рік. Міжнародне агентство з атомної енергетики. Vienna International Centre. Vienna, Austria (2022), 212 с.
2. Носовський А. В., Бондар Б. М. Дозиметрія та захист від іонізуючого випромінювання. К.: Інститут проблем АЕС НАН України, 2020. 406 с.
3. Технічне рішення – 2021-16.001-ТР. «Переміщення «окремо розташованих» та «легко перемішуваних» об'єктів з території колишнього ВО «Придніпровський хімічний завод» на майданчик тимчасового зберігання упаковок з РЗМ та вимоги до експлуатації майданчика тимчасового зберігання упаковок з РЗМ». 2021. 98 с.
4. Звіт за договором № 15-16 від 10.11.2016 р. про надання послуг: Проведення оцінки структури вертикального розподілу радіонуклідів і токсичних хімічних елементів у ґрунті на найбільш забруднених ділянках території державного підприємства «Бар'єр» (заключний). – Український гідрометеорологічний інститут (УкрГМІ), Київ, 2016, 114 с.
5. Shohda, AM; Draz, W.M.; Ali, FA; Yassien, M.A. Natural radioactivity levels and radiological hazard assessment of some Egyptian ornamental stones. *J. Radiat. Res. dec. scientific* 2018, 11, 323–327. DOI: 10.1016/j.jrras.2018.06.002
6. Taşkın, H., Yeşilkanat, C.M., Kobyay, Y. *et al.* Evaluation and mapping of radionuclides in the terrestrial environment and health hazard due to soil radioactivity in Artvin, Turkey. *Arab J Geosci* 11, 729 (2018). <https://doi.org/10.1007/s12517-018-4063-8>
7. Ugbede, Federal District; Osakhon, O.D. Soil-to-plant transfer factors ²³⁸U and ²³²Th in rice from the Ezillo paddy fields, Ebony State, Nigeria. *J. Environment. Radioact.* 2021, 233, 106606. DOI:10.1016/j.jenvrad.2021.106606
8. Wasif, MAM; Alrovailly, Z. A.; Elsaman, R.; Mostafa, AMA Transfer factor of natural radionuclides to soil and soybeans in soils of different granulometric composition and estimation of the committed effective dose. *radiat. arch. Dosim.* 2020, 188, 529–535. DOI:10.1093/rpd/ncaa005
9. Yeşilkanat, CM A new hybrid approach to mapping and predicting the distribution of ground-based gamma dose rates in the Central Anatolia region of Turkey. *J. Environment. Radioact.* 2019, 208–209, 106009. DOI:10.1016/j.jenvrad.2019.106009
10. Disman, S.; Hodolly, G.; Kadiri, S.; Aliu, H.; Makolli, S. Radioactivity of Kosovo honey samples. *floor. J. Environment. Stud.* 2020, 29, 1119–1127. DOI:10.15244/pjoes/105968
11. Disman, S.; Göryur, FC; Keser, R.; Göryur, O. Evaluation of Radioactivity and Radiation Hazard in Soils of Bolu Province, Turkey. *Environment. Forensics* 2019, 20, 211–218. DOI:10.1080/15275922.2019.1629129
12. Mostafa, AMA; Wasif, MAM; Elsaman, R.; Alrovailly, Z. A.; Mustafa, E. Dependence of levels of natural radioactivity and its radiological hazard on the composition of agricultural soils in Upper Egypt. *Environment. Earth Sciences.* 2020, 79, 228. DOI:10.1007/s12665-020-08946-z