

## РОЗРОБКА СИСТЕМИ ЗАХИСТУ НАВКОЛИШНЬОГО СЕРЕДОВИЩА ВІД РАДІОАКТИВНО ЗАБРУДНЕНИХ МАТЕРІАЛІВ (НА ПРИКЛАДІ КОЛИШНЬОГО ВО «ПХЗ»)

Микитась Д.О.<sup>1</sup>, Білоус М.А.<sup>1</sup>, Полушкін Ю.Ю.<sup>2</sup>, Іващенко Т.Г.<sup>3</sup>, Гунько С.О.<sup>4</sup>, Рець Є.Ю.<sup>5</sup>

<sup>1</sup>Державне підприємство «Бар'єр»

пр. Аношкіна 179Б, 51938, м. Кам'янське

<sup>2</sup>Державне спеціалізоване підприємство «Об'єднання «Радон»

<sup>3</sup>Державна екологічна академія післядипломної освіти та управління  
вул. Митрополита Василя Липківського, 35, корп. 2, 03035, м. Київ

<sup>4</sup>Дніпровський національний університет імені Олеся Гончара  
пр. Гагаріна, 72, 49010, м. Дніпро

<sup>5</sup>Дніпровський державний аграрно-економічний університет  
вул. Сергія Єфремова, 25, 49000, м. Дніпро

dengv-sev@ukr.net, beloys\_mihail@ukr.net, y.y.pol@radon.net.ua,  
emaa.dea@ukr.net, goonko@gmail.com, recz977@gmail.com

Висвітлені й узагальнені результати ретроспективних інформаційно-аналітичних досліджень. Керуючись ними, розглянуто науково – екологічну інформацію щодо створення системи захисту навколишнього середовища від розповсюдження радіаційного зараження з огляду на антропогенну діяльність промислового напрямку на прикладі колишнього ВО «Придніпровський хімічний завод».

Зважаючи на те, що очищення поверхонь будь-якого типу від радіонуклідів вимагає певного виду поводження з відходами або радіоактивно забрудненими матеріалами (РЗМ) – зберігання, захоронення, утилізацію тощо, власне, як і будь-яка діяльність з відновлення, потребує попереднього розроблення заходів щодо поводження з відходами та системи захисту навколишнього середовища, що безпосередньо межує з такими місцями зберігання.

Окреслені питання щодо прийняття рівнів звільнення радіоактивно забруднених матеріалів, особливо за ситуацій, коли застосовуються обмеження на їх використання. З'ясовано, що поводження з відходами, які потребують дезактивації, зумовлює вирішення численних технічних, логістичних та коротко- і середньострокових питань, які мають повною мірою й обов'язково враховуватися у будь-якому розроблюваному плані, спрямованому на реабілітацію великих територій.

Кожен з варіантів вимагає виділення РЗМ територій значної корисної площі від 100 м<sup>2</sup> до 21500 м<sup>2</sup>, і відповідно в значеннях корисного об'єму від 27800 м<sup>3</sup> до 150000 м<sup>3</sup>. Такі розміри адаптовані в існуюче хвостосховище, яке знаходиться на балансі ДП «Бар'єр». Це – Секція 2 хвостосховища «Сухачівське». Іншими варіантами є майданчик для тимчасового зберігання РЗМ в районі хвостосховища «Південно-Східне» і новозбудоване сховище тимчасового та/або довгострокового зберігання неподалік хвостосховища «Південно-Східне».

Серед засобів пакування РЗМ, що підлягають тимчасовому або довгостроковому зберіганню, рекомендовано використовувати 20-футові контейнери та упаковку РРТ-1.5. Розрахунки потужності дози гамма-випромінювання для таких засобів пакування засвідчують раціональність їх використання.

Статистико-математична обробка (моделювання) показників для даних засобів пакування засвідчить про лінійну залежність зниження рівня дози гамма-випромінювання, яка прямує до нуля при віддаленні від об'єкта більше, ніж на 4 м. Окрім того, рекомендовано обладнати територію навколо складованих об'єктів пакування РЗМ загорожею, яка б унеможливила несанкціонований доступ до них, а також потрапляння диких тварин.

Запропоновані елементи системи захисту навколишнього середовища під час тимчасового чи довгострокового зберігання РЗМ дозволяють значно мінімізувати знаходження з ними населення навколишніх урбанізованих і селітебних зон, а також представників флори і фауни локальних біоценозів. *Ключові слова:* радіоактивно забруднені матеріали, хвостосховища, гамма-випромінювання, засіб пакування.

**Establishment of a system of environmental protection from radioactively contaminated materials (on the example of former PCHP). Mykytas D., Bilous M., Polushkin Yu., Ivashchenko T., Hunko S., Rets Ye.**

Based on the analysis and generalization of the results of retrospective information and analytical studies, a review of scientific information on the creation of an environmental protection system to avoid the spread of radiation contamination through anthropogenic activities of the industrial sector is presented on the example of the former PA "Pridniprovskiy Chemical Plant".

Considering the fact that cleaning of any surfaces from radionuclides requires a certain type of waste management or radioactively contaminated materials (RCM) – storage, burial, disposal, etc., any type of remediation activity requires the preliminary development of waste management measures and an environmental protection system that located near such a storage areas.

The issue of adopting radioactively contaminated materials clearance levels is considered especially for situations where restrictions on their use will be applied. It is found that the waste management in need of decontamination raises numerous technical, logistical and short- and medium-term issues that must be fully and necessarily considered in any plan aimed at the rehabilitation of large areas.

The article provides the characteristics of the objects where radioactively contaminated materials to be collected and stored are located, as well as two options for placing them for their temporary or long-term storage.

Each of the options requires the allocation for RCM territories of a significant area from 100 m<sup>2</sup> to 21500 m<sup>2</sup>, and, accordingly, in the useful storage volume from 27800 m<sup>3</sup> to 150000 m<sup>3</sup>. Such dimensions fit into the existing tailing, which belongs to SE "Barrier". It is Section 2 of "Sukhachivske" tailing. Another option is a site for a temporary RCM storage, or a newly built temporary and/or long-term storage facility near the "Pivdenno-Skhidne" tailing.

Regarding the packages with RCM that are subject to temporary or long-term storage it is recommended to use 20-foot containers and flexible packages PPT-1.5. According to the calculations of the dose rate of gamma radiation of these packages, they indicate the rationality of their use.

Statistical and mathematical processing (modelling) of these indicators for these packages indicates a linear dependence of the decrease in the level of gamma radiation dose, which tends to zero at a distance of more than 4 m from the object. In addition, it is recommended to equip the area around the established objects for RCM storage with a fence which would prevent unauthorized access to this area, as well as the entry of wild animals.

The proposed elements of the environmental protection system for temporary or long-term storage of RCM can significantly minimize the presence with them of the population of the surrounding urbanized and residential zones, as well as representatives of the flora and fauna of local biocenoses. *Key words*: radioactively contaminated materials, tailings, remediation, packaging, gamma radiation.

**Постановка проблеми.** Зважаючи на велику небезпеку, що можуть спричинити радіоактивні елементи, їх пошук та утилізація мають пріоритетне значення як для моніторингу стану навколишнього природного середовища, так і для забезпечення здоров'я людей, які перебувають неподалік. Джерела, що випромінюють радіацію чи отруйних газ, наприклад, радон, можуть знаходитися під товстою ґрунту та непомітно для людей впливати на них. [1]. Так, вчені Gutiérrez-Alvarez, I.; Martín, J.E. et al. у своїй праці [2] розглянули продуктивність різних методів відбору радону, аналогічні дослідження були проведені іспанськими науковцями [3].

Тема розроблення систем для виявлення радіоактивного забруднення ретельно досліджується науковцями світу, не втрачаючи своєї актуальності.

Робота португальських вчених [4] присвячена оцінці масової активності та концентрацій природних радіонуклідів у хвостосховищах поліметалевих та Ra/U копалень.

На сьогодні активно здійснюються дослідження з питань розвитку програм моніторингу радіаційної активності навколишнього середовища та утилізації радіоактивно забруднених матеріалів.

Щодо утворення значної кількості відходів від видобутку залізняку та проблем їх утилізації в своїй праці розглядають Thejas, H.K.; Hossiney, N. [5]. У ній автори зробили короткий огляд екологічних проблем, спричинених неправильною утилізацією відходів, а також методів їх вторинного використання у будівельній галузі з метою зменшення забруднення навколишнього середовища.

Прпця Araujo, F.S.; Tabora-Llano, I. et al. [6] присвячена дослідженням основних методів переробки та повторного використання хвостів гірничодобувної промисловості, розглядаються передові технології, зокрема їх переваги та обмеження, а також перспективи впровадження.

Інвентаризація хвостів металургійних копалень у Фінляндії показала [7], що у відходах містяться

значні концентрації багатьох критичних металів. У роботі Phillip, E.; Choo, T.F.; Khairuddin et al. [8] представлені результати використання геополімерів як сорбентів для видалення радіоактивних забруднювачів з рідких потоків відходів та іммобілізаційних матриць для локалізації різних радіоактивних відходів.

Зважаючи на те, що очищення поверхонь будь-якого типу від радіонуклідів вимагає певного виду поводження з відходами або радіоактивно забрудненими матеріалами – зберігання, захоронення, утилізацію, як і будь-яка інша діяльність з відновлення, вимагає попереднього розроблення заходів щодо поводження з відходами та системи захисту навколишнього середовища, що безпосередньо межує з місцями зберігання.

У 1948 році було започатковано уранове виробництво у місті Кам'янське на базі виробничих потужностей ВО «Придніпровський хімічний завод». Як відомо, 65% всіх уранових руд колишнього Радянського Союзу перероблялися саме в цьому промисловому комплексі. Значення підприємства було дійсно велике, бо навіть один з найбільших уранових хімічних заводів у колишньому СРСР, який був заснований у казахському місті Шевченко, був побудований саме на технологіях, розроблених саме на ВО «Придніпровський хімічний завод».

Протягом чотирьох десятиліть роботи ВО «Придніпровський хімічний завод» на ньому сформувалася велика кількість радіоактивних відходів. З початку на цьому підприємстві перероблялися уранові руди з родовища Вісмут, розташованому на кордоні Чехії та колишньої НДР, а потім з вітчизняних родовищ у Жовтих Водах і казахського Мангішлаку [9].

Після закриття підприємства ВО «Придніпровський хімічний завод» у 1991 році, після 44 років роботи на майданчику, протягом 30 років майже не проводилася дезактивація об'єктів. Через це небезпечність будівлі колишнього підприємства приходили в небезпечний стан, і крім того на його

території накопичилось близько 7100 м<sup>3</sup> радіоактивно забруднених матеріалів та обладнання (РЗМ), які перебувають на всій території майданчика, і не відома на сьогодні кількість РЗМ в забруднених ґрунтах. Переважно РЗМ зосереджені в будівлях, які використовувались у виробничих процесах, але численні радіоактивно забруднені ділянки розташовані по всій території майданчика ВО «Придніпровський хімічний завод» [10].

Таким чином, постало питання про розроблення чіткої та ефективної системи захисту навколишнього середовища від РЗМ, які утворилися ще за часів експлуатації виробничих приміщень ВО «Придніпровський хімічний завод» і після його реструктуризації. Дане питання є досить актуальним для сьогодення Кам'янського, спроба його розв'язання лягла в основу даної наукової роботи.

Починаючи з реструктуризації колишнього ВО «Придніпровський хімічний завод» у 1991 році було припинено переробку уранових руд для виробництва оксиду рану в місті Кам'янське. Таким чином протягом інтенсивної виробничої діяльності, котра тривала понад 40 років з 1948 року по 1991 рік, а також подальший 30-річний період бездіяльності щодо дезактивації території підприємства від радіаційного зараження, накопичилось близько 7100 м<sup>3</sup> радіоактивно забруднених матеріалів та обладнання. Крім заходів щодо збирання РЗМ з території колишнього підприємства, також важливо визначити якнайбільш ефективний і безпечний метод зберігання зібраних РЗМ. Для цього необхідно створити систему захисту навколишнього середовища від об'єктів зберігання РЗМ.

**Виклад основного матеріалу.** Метою даної роботи – розробка системи захисту навколишнього середовища від РЗМ, які підлягають тимчасовому або довгостроковому зберіганню, на прикладі колишнього ВО «Придніпровський хімічний завод» в м. Кам'янське Дніпропетровської області.

Об'єкт дослідження: ефективність заходів щодо збереження РЗМ і їх захист від стороннього впливу.

Предмет дослідження: вплив характеристик складових системи збереження РЗМ (упаковки з РЗМ) на ефективність збереження навколишнього середовища.

Надзвичайно важливим питанням сьогодення є розробка і побудова чітких критеріїв оцінки та заходів щодо захисту як територій, які використовуються в якості хвостосховищ, так і територій, які безпосередньо межують з ними. Такі критерії оцінки і захисту об'єктів по збереженню промислових відходів із вмістом радіонуклідів у значних кількостях дозволять проводити більш активну та ефективну утилізацію і переробку забруднених ґрунтів. Тому розглянемо деякі підходи та заходи щодо безпечного поводження з ґрунтами, які зазнають радіонуклідного ураження різними шляхами.

Одним з найбільших і найвідоміших прикладів ураження радіоактивними відходами навколиш-

нього середовища був інцидент, який стався внаслідок аварії на АЕС у префектурі Фукусіма (Японія) у 2011 році. Згідно із міжнародною шкалою ядерних подій, що розроблена МАГАТЕ у 1988 році, ця аварія класифікувалася сьомим рівнем, що ставить її майже на одну площину з аварією на Чорнобильській АЕС у 1986 році [11].

Природа дезактиваційних відходів (які здебільшого складаються з відносно низькоактивних матеріалів, що включають забруднений ґрунт, рослинність тощо) вимагає застосування спеціально розроблених процесів переробки, зберігання та захоронення відходів. Зважаючи на велику кількість відходів, надзвичайно важливо розглянути питання про сегрегацію та обробку відходів дезактивації для зменшення їх обсягів з метою мінімізації проміжних обсягів і особливо обсягів захоронення [11].

**Фоновий вміст радіонуклідів у ґрунтах.** Результати вимірювання вмісту радіонуклідів в ґрунтах, відібраних на фонових точках в районі м. Кам'янське свідчать про дуже низьку концентрацію природних радіонуклідів, що спостерігається на фоновому рівні. В цілому, їх середній вміст коливається в діапазоні 18–60 Бк/кг при рівні вилучення у 1000 Бк/кг. Вміст штучного радіонукліду Cs-137, присутність якого пов'язано з наслідками глобальних викидів внаслідок аварії на Чорнобильській АЕС, коливається в межах 0,9–16 Бк/кг при рівні звільнення у 10000 Бк/кг.

Вміст К-40 відповідає типовим значенням для ґрунтів регіону від 80 Бк/кг для пісків до 500 Бк/кг для чорноземів, при рівні вилучення 10 000 Бк/кг.

**Опис технологічних рішень варіантів для тимчасового та/або довгострокового зберігання РЗМ ДП «Бар'єр».** У 1992 році на колишній території ВО «Придніпровський хімічний завод» було розпочате перепрофілювання і реструктуризація, в результаті якої були утворено ряд підприємств, серед яких ДП «Бар'єр», до складу яких увійшла частина будівель і споруд колишнього уранового виробництва (див. рисунок 1).

Беручи до уваги все вище зазначене, а також рівні забруднення об'єктів, котрі знаходяться на території колишнього ВО «Придніпровський хімічний завод», постало питання про переміщення радіаційно забруднених окремо розташованих та легко переміщуваних об'єктів на майданчик зберігання упаковок з РЗМ. Такі заходи спрямовані на часткову реабілітацію та поліпшення радіаційної обстановки промислового майданчика колишнього ВО «Придніпровський хімічний завод» шляхом збору та видалення понад 200 радіоактивно забруднених об'єктів та їх розміщення на спеціально обладнаному майданчику для тимчасового зберігання упаковок з РЗМ [9, 10].

У свою чергу зберігання упаковок з РЗМ вимагає додаткового захисту цих матеріалів від пошкодження природним або антропогенним шляхом, щоб не допустити розповсюдження радіаційного забруд-

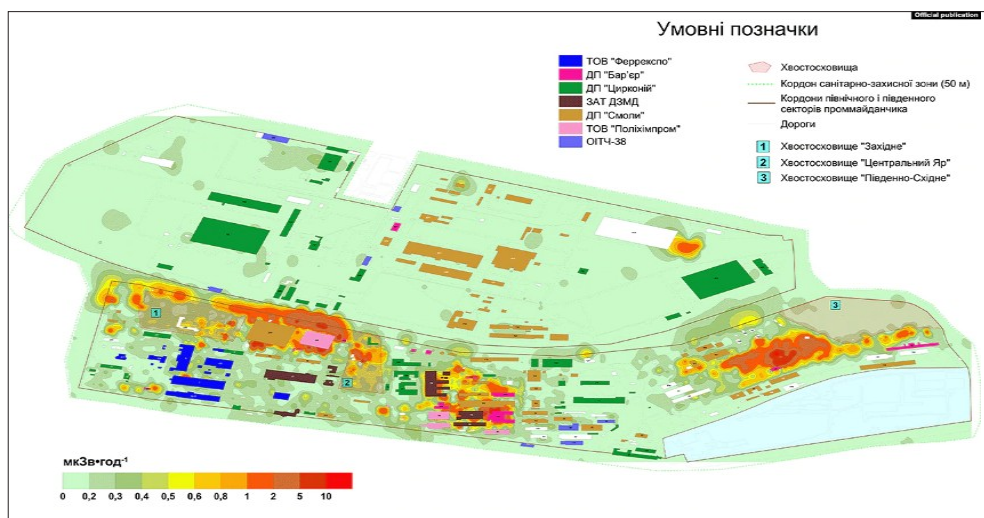


Рис. 1. Карта реструктуризованої території колишнього ВО «Придніпровський хімічний завод» на фоні зон їх ураження радіаційним забрудненням

нення навколишнього середовища з несанкціонованим або неконтрольованим переміщенням РЗМ в межах міста Кам'янське та прилеглих до нього територій. Тому для розміщення РЗМ, які перебувають за межами контрольованих зон ДП «Бар'єр» виникає нагальна потреба в додатковому об'єкті для зберігання та/або захоронення РЗМ. В даній роботі розглядається декілька об'єктів/майданчиків для організації сховища для тимчасового та/або довгострокового зберігання РЗМ:

- на хвостосховищі «Сухачівське», Секція 2;
- на майданчику для тимчасового зберігання;
- у новозбудованому сховищі поблизу існуючого хвостосховища «Південно-Східне».

Основним призначенням проектного майданчика є забезпечення оптимального розміщення

проектної кількості упаковок з РЗМ та їх безпечного контрольованого зберігання протягом 10 років.

**Варіант 1. Розміщення РЗМ на хвостосховищі «Сухачівське», Секція 2, й у новозбудованому сховищі тимчасового та/або довгострокового зберігання поблизу існуючого хвостосховища «Південно-Східне».** Нова секція для розміщення твердих відходів реабілітації ВО «Придніпровського хімічного заводу» організовується в північній частині хвостосховища «Сухачівське-2» з примиканням до розділової дамби між 1 і 2 секціями. Зазначена секція ізольована від основної часті та розташована на сухій частині хвостосховища (див. рисунок 2).

Секція 2 хвостосховища «Сухачівське» експлуатувалась з 1983 по 1991 рр. Ця секція хвостосховища «Сухачівське» використовувалась для накопичення



Рис. 2. Карта-схема розміщення хвостосховища «Сухачівське»

як відходів переробки уранової сировини, так і відходів хімічного виробництва [10].

Хвостосховище «Сухачівське» знаходиться на відстані 14 км на південний схід від майданчика колишнього ВО «Придніпровського хімічного заводу», в балці Росоловата. Характеристику сховища для зберігання РЗМ надано у таблиці 1.

Всі роботи по складуванню, ущільненню та ізоляції РЗМ на сховищі виконуються механізовано. Технологічна схема розміщення РЗМ у сховищі складається з наступних операцій:

- перевезення РЗМ з промайданчика до сховища;
- приймання РЗМ, здійснення обліку та вхідного контролю;
- розміщення РЗМ у сховищі;
- зрошення РЗМ (пилопригнічення);
- ущільнення РЗМ;
- ізоляція РЗМ захисним/протирадоновим шаром (перекриття сховища) – рекультивация.

Дещо менші показники сховища має новозбудований об'єкт, який знаходиться поблизу існуючого хвостосховища «Південно-Східне». Він запроєктований для тимчасового та/або довгострокового зберігання РЗМ і має наступні характеристики зазначені в таблиці 2.

Для забезпечення безперешкодної робіт з дезактивації мають бути передбачені підготовчих роботи з:

- огороження та встановлення знаків радіаційної безпеки (РБ) навколо території ділянок;
- видалення рослинності на всіх ділянках;

– облаштування тимчасової (експлуатаційної) під'їзної гравійної автодороги на Ділянці №1 для забезпечення проїзду автотракторної техніки відповідної вантажопідйомності [10].

**Варіант 2. Розміщення РЗМ на майданчику для тимчасового зберігання, що знаходиться в межах контрольованої зони №4 хвостосховища «Південно-Східне».** Майданчик для контейнерного зберігання РЗМ запроєктовано з метою створення умов безпечного розміщення та зберігання «окремо розташованих» та «легко переміщуваних» РЗМ з промислового майданчику колишнього ВО «Придніпровського хімічного заводу».

Для зберігання РЗМ передбачається використання сталевих 20-футових контейнерів та пакувальних комплектів РРТ-1.5 (далі – упаковки). Доцільність використання цих упаковок для зберігання РЗМ обґрунтована їхніми наступними технічними характеристиками [10].

Технічні характеристики 20-фунтових контейнерів зберігання РЗМ представлені в таблиці 3.

Для зберігання РЗМ передбачається використання сталевих 20-футових контейнерів та пакувальних комплектів РРТ-1.5.

Іншим елементом упаковки РЗМ пропонується обрати пакувальний комплект РРТ-1.5, являє собою гнучкий комплект (з плоским дном, двома кришками та двома застібками-блискавками), який розміщений на металевій опорній рамі, закритий зверху металевою кришкою та закритий з боків оболонкою з тканого поліпропілену з ламінованою поверхнею (тентом).

Таблиця 1

**Характеристика сховища РЗМ за варіантом 1**

корисний об'єм, м <sup>3</sup>	150000,0
корисна площа (з внутрішніми відкосами), м <sup>2</sup>	21500,0
середня висота складування, м	12,0
корисний об'єм, м <sup>3</sup>	900,0
корисна площа (з внутрішніми відкосами), м <sup>2</sup>	5400,0/2000,0
середня висота складування, м	210,0
довжина зовнішнього дренажу по дамбі, м	900,0
довжина внутрішнього дренажу, м	120,0
довжина напірного колектору від насосної станції дренажних вод, м	300,0

Таблиця 2

**Характеристика сховища РЗМ поблизу існуючого хвостосховища «Південно-Східне»**

корисний об'єм, м <sup>3</sup>	27800,0
корисна площа (з внутрішніми відкосами), м <sup>2</sup>	8100,0
середня висота складування, м	6,0
довжина дамби, м	450,0
площа дороги по дамбі, м <sup>2</sup>	1780,0
площа дороги на з'їзд з дамби в чашу, м <sup>2</sup>	210,0
довжина зовнішнього дренажу по дамбі, м	440,0
довжина внутрішнього дренажу, м	120,0
довжина напірного колектору від насосної станції дренажних вод, м	60,0

Таблиця 3

## Технічні характеристики 20-фунтових контейнерів для зберігання РЗМ

Зовнішні розміри (орієнтовно)	Довжина, мм	6096,00
	Ширина, мм	2440,00
	Висота, мм	2590,00
Внутрішні розміри (орієнтовно)	Довжина, мм	5902,00
	Ширина, мм	2430,00
	Висота, мм	2352,00
Об'єм контейнера, м <sup>3</sup>		34,00
Маса нетто, кг		2440,00
Максимальне навантаження, кг		21560,00
Маса брутто, кг		24000,00

Пакувальний комплект РРТ-1.5 (далі – пакувальний комплект) призначений для зберігання твердих низькоактивних відходів, таких як:

- ґрунти, пісок, щебінь;
- деревина, пластик, гума;
- битий бетон, арматура та інші будівельні відходи (наприклад, цегла, скло, кераміка);
- металеві конструкції.

Майданчик для зберігання упаковок з РЗМ є окремо розташованою ділянкою в південно-східній частині промислового майданчика ВО «Придніпровського хімічного заводу» в районі розміщення хвостосховища «Південно-Східне». Проектований майданчик для зберігання упаковок з РЗМ знаходиться в межах контрольованої зони №4 хвостосховища «Південно-Східне».

Майданчик тимчасового зберігання має складну форму з розмірами сторін 45,00×37,50×30,00×17,50×30,50 м. Разом з тим невеликі геометричні розміри майданчика дозволяють проводити операції з розміщення необхідної кількості упаковок, а саме: 40 сталевих 20-фунтових контейнерів в один ярус або 32 сталевих 20-фунтових контейнера в один ярус та 250 пакувальних комплектів РРТ-1.5 в один ярус [9, 10].

## Модельовання потужності дози гамма-випромінювання від упаковок для зберігання РЗМ.

Збирання в упаковки є надійним методом унеможливлення поширення РЗМ у середовищі в тимчасовій або довгостроковій перспективі, самі матеріали з яких зроблені засоби пакування зазнають певної дози опромінення. Відповідно контакт з упакованими РЗМ матиме потенційний негативний вплив на працівників, які обслуговуватимуть розроблені системи захисту навколишнього середовища, що полягають у зберіганні і запобіганні розповсюдження радіоактивного забруднення. Тому для визначення потужності дози гамма-випромінювання від матеріалів, що входять до складу пакування РЗМ, були обрані такі показники:

- тип відходів: ґрунт та продукти переробки;
- тип упаковки: 20-фунтовий контейнер та пакувальний комплект РРТ-1.5;
- джерело активності продукту переробки (усічений конус об'ємом 1,15 м<sup>3</sup>) моделюється циліндром висотою 1,05 м та ефективним діаметром 1,18 м [9] з товщиною металеві стінки 3 мм. Маса заповненого циліндру 2500 кг, порожнього – 236 кг;
- розрахункова густина продукту переробки становить 1,97 г/см<sup>3</sup>, густина металу – 7,86 г/см<sup>3</sup>;
- перелік радіонуклідів продукту переробки – <sup>238</sup>U, <sup>234</sup>Th, <sup>225</sup>Ac, <sup>234</sup>Pa, <sup>228</sup>Ac, <sup>229</sup>Th [9];
- середня потужність дози від джерела активності продукту переробки (циліндра) становить 10 мкЗв/год на відстані 1 см або з урахуванням коефіцієнта запасу 2 становить 20 мкЗв/год.
- максимальні питомі активності радіонуклідів <sup>210</sup>Pb, <sup>210</sup>Po, <sup>226</sup>Ra, <sup>228</sup>Th, <sup>230</sup>Th, <sup>234</sup>U, <sup>238</sup>U, <sup>235</sup>U, <sup>231</sup>Pa, <sup>227</sup>Ac, <sup>232</sup>Th, <sup>228</sup>Ra у ґрунті у буд. 103 ВО «Придніпровського хімічного заводу», що наведені у таблиці 4 [9, 10];
- густина ґрунту становить 1,5 г/см<sup>3</sup>.

Користуючись такими даними та програмним забезпеченням Microshield 8.02 була розрахована потужність дози гамма-випромінювання для упаковок РЗМ.

Для модельовання джерела активності продукту переробки у вигляді циліндру з переліку радіонуклідів обирали один з найбільш інтенсивним спектром гамма-випромінювання – <sup>234</sup>Pa.

На основі здійснених розрахунків була визначена питома активність радіонукліду <sup>234</sup>Pa у продукті переробки, яка має відповідати потужність дози на відстані 1 см від циліндра 20 мкЗв/год. За даними розрахунку питома активність продукту переробки складає 5,96×10<sup>4</sup>Бк/кг або 59,6 кБк/кг.

Маючи наявні характеристики продукту переробки розраховано потужність дози від 20 фунтового контейнеру, який пропонується заповнювати

Таблиця 4

## Максимальні питомі активності радіонуклідів у ґрунті

№	Радіонуклід	Максимальні питомі активності радіонуклідів у ґрунті, Бк/кг
1	Pb-210	4,40E+04
2	Po-210	4,40E+04
3	Ra-226	1,68E+05
4	Th-228	3,00E+03
5	Th-230	2,36E+05
6	U-234	3,12E+06
7	U-238	3,12E+06
8	U-235	1,56E+05
9	Pa-231	1,56E+05
10	Ac-227	1,18E+04
11	Th-232	3,00E+03
12	Ra-228	3,00E+03

продуктом переробки, та мав форму прямокутного паралелепіпеда з такими розмірами: довжиною – 590 см, шириною – 236 см і висотою – 105 см. Такі розміри дозволяють заповнення циліндрами в один ярус 20-футового контейнеру 5 одиниць по довжині та 2 одиниці по ширині [10].

Результати розрахунку потужності дози гамма-випромінювання від джерел активності продукту переробки різної форми наведені у таблиці 5.

Джерело активності у пакувальному комплекті РРТ-1.5 моделювали, консервативно керуючись відомими для ґрунту у буд. 103 ВО «Придніпровського хімічного заводу» максимальними значеннями питомої активності радіонуклідів  $^{210}\text{Pb}$ ,  $^{210}\text{Po}$ ,  $^{226}\text{Ra}$ ,  $^{228}\text{Th}$ ,  $^{230}\text{Th}$ ,  $^{234}\text{U}$ ,  $^{238}\text{U}$ ,  $^{235}\text{U}$ ,  $^{231}\text{Pa}$ ,  $^{227}\text{Ac}$ ,  $^{232}\text{Th}$ ,  $^{228}\text{Ra}$  у ґрунті.

Результати розрахунку потужності дози від ґрунту для різної геометрії упаковок наведені у таблиці 6.

Отже, аналізуючи данні з таблиць 5 і 6, можна зробити висновок щодо ефективності застосування пакувальних засобів, таких як 20-фунтові контейнери і гнучкі упаковки РРТ-1.5. Навіть за великої концентрації цих пакувальних об'єктів наповнених РЗМ можна простежити чітку лінійну

залежність зниження рівня потужності дози гамма-випромінювання, поступово віддаляючись від об'єкту.

Розглянуті два варіанти розміщення РЗМ, які утворилися на території колишнього ВО «Придніпровський хімічний завод». Кожен з них потребує виділення РЗМ територій значної корисної площі від 100 м<sup>2</sup> до 21500 м<sup>2</sup>, і відповідно в значеннях корисного об'єму від 27800 м<sup>3</sup> до 150000 м<sup>3</sup>. Такі розміри актуалізовані в існуючі хвостосховища, що знаходяться на балансі ДП «Бар'єр». Серед них можна виділити: Секція 2 «Сухачівське», майданчик в районі хвостосховища «Південно-Східне» і новозбудоване сховище тимчасового та/або довгострокового зберігання поблизу хвостосховища «Південно-Східне».

Серед засобів пакування РЗМ, які підлягають тимчасовому або довгостроковому зберігання, рекомендовано використовувати 20-фунтові контейнери та гнучке комплектування упаковки РРТ-1.5. Згідно розрахунків потужності дози гамма-випромінювання цих засобів пакування свідчать про раціональність їх використання.

Таблиця 5

## Результати розрахунку потужності дози від джерел активності продукту переробки різної форми

№	Форма джерела активності продукту переробки	Потужність дози гамма-випромінювання на висоті 52,65 см (циліндр) та 50,00 см (контейнер) на різних відстанях, мкЗв/год							
		1,0 см	10,0 см	25,5* см	50,0 см	78,0* см	100,0 см	200,0 см	400,0 см
1	Циліндр	20,02	15,26	-	5,80	-	2,56	0,88	0,26
2	20-футовий контейнер	-	28,20	22,24	15,68	11,24	9,01	-	-

Примітка: позначкою \* відмічена відстань від персоналу до 20-футового контейнеру з РЗМ при здійсненні поточного (регламентного) дозиметричного контролю на майданчику.

Таблиця 6

## Результати розрахунку потужності дози від РРТ-1.5 з ґрунтом для різної геометрії упаковок

№	Форма джерела активності	Потужність дози гамма-випромінювання на висоті 0,5 м на різних відстанях, мкЗв/год						
		10,0 см	25,5* см	50,0 см	78,0* см	100,0 см	200,0 см	400,0 см
1	Пакувальний комплект РРТ-1.5	5,11	3,50	2,02	1,17	0,82	0,26	0,07
2	Блок РРТ-1.5, який складається з 2-х од.	5,34	3,99	2,61	1,71	1,28	-	-
3	Блок РРТ-1.5, який складається з 4-х од.	5,35	4,10	2,66	1,73	1,29	-	-
4	Блок РРТ-1.5, який складається з 6-ти од.	5,36	4,19	2,84	1,96	1,50	-	-

Примітка: позначкою \* відмічена відстань від персоналу до РРТ-1.5 з РЗМ при здійсненні поточного (регламентного) дозиметричного контролю на майданчику.

Показники вищенаведених таблиць дозволили створити діаграми, представлені на рисунках 3, 4 і 5, які підтверджують таку математичну залежність.

Статистико-математична обробка (моделювання) цих показників для даних засобів пакування свідчить про лінійну залежність зниження рівня дози гамма-випромінювання, що прямує до нуля при відда-

лені від об'єкта більше, ніж на 4 м. Окрім того, рекомендовано облаштувати територію навколо складених об'єктів пакування РЗМ огорожею, яка б унеможливила несанкціонований до них доступ та проникнення диких тварин.

Запропоновані елементи системи захисту навколишнього середовища при тимчасовому чи дов-

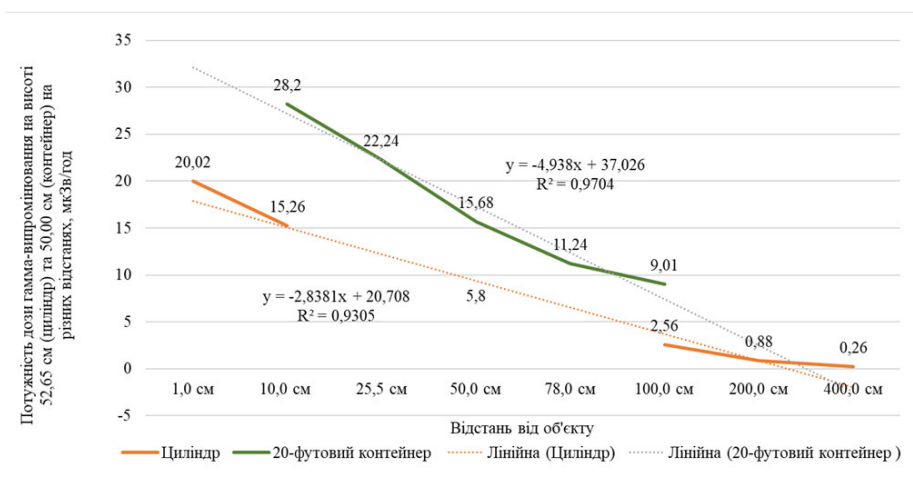


Рис. 3. Діаграма показнику потужності дози гамма-випромінювання щодо циліндра і 20-футового контейнера

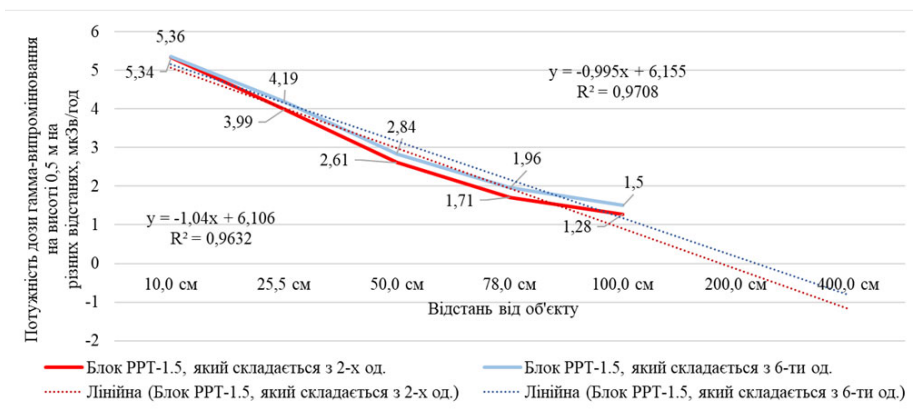


Рис. 4. Діаграма показнику потужності дози гамма-випромінювання щодо блоків РРТ-1.5 з 2 і 6 одиниць

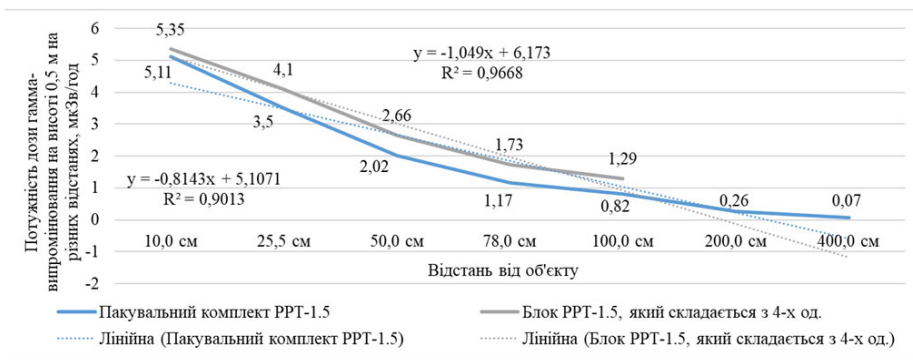


Рис. 5. Діаграма показнику потужності дози гамма-випромінювання щодо блоків РРТ-1.5 з 1 і 4 одиниць



гостроковому зберіганні РЗМ дозволяють значно мінімізувати знаходження з ними населення навколишніх урбанізованих і селітебних зон, а також представників флори і фауни локальних біоценозів.

**Висновки.** У праці розглянуті два варіанти розміщення РЗМ, що утворилися на території колишнього ВО «Придніпровський хімічний завод». Кожен з варіантів вимагає виділення РЗМ територій значної корисної площі від 100 м<sup>2</sup> до 21500 м<sup>2</sup>.

Серед засобів пакування РЗМ, що підлягають тимчасовому або довгостроковому зберіганню, рекомендовано використовувати 20-фунтові контейнери та гнучке комплектування упаковки РРТ-1.5. Згідно з розрахунками потужності дози гамма-випромінювання таких засобів пакування засвідчують раціональність їх використання.

Моделювання (статистико-математична обробка) цих показників для даних засобів пакування свідчить про лінійну залежність зниження рівня дози гамма-випромінювання, яка прямує до нуля при віддалені від об'єкта більше, ніж на 4 м.

Запропоновані елементи системи захисту навколишнього середовища при тимчасовому чи довгостроковому зберіганні РЗМ дозволяють значно мінімізувати знаходження з ними населення навколишніх урбанізованих і селітебних зон, а також представників флори і фауни локальних біоценозів.

Отже, застосування методів пакування і хостингу РЗМ як частини заходів з охорони радіаційно забруднених територій є важливою складовою у створенні систем захисту навколишнього середовища від потенційних небезпек.

### Література

1. Наконечний, В. Г., Гунько, С. О., Белянська О. Р. Дослідження диференційної міграції мангану у сільськогосподарських землях шляхом комплексування методів. *International Science Journal of Engineering & Agriculture* Vol. 2, No. 2, 2023, pp. 153–165. doi: 10.46299/j.isjea.20230202.15
2. Guteerrez-Alvarez, I.; Martin, J.E.; Adame, J.A.; Grossi, C.; Vargas, A.; Bolivar, J.P. Applicability of the closed-circuit accumulation chamber technique to measure radon surface exhalation rate under laboratory conditions. *Radiat. Meas* 2020, 133, 106284. <https://doi.org/10.1016/j.radmeas.2020.106284>
3. Gutierrez-Alvarez, I.; Guerrero, J.L.; Martín, J.E.; Adame, J.A.; Bolivar, J.P. Influence of the accumulation chamber insertion depth to measure surface radon exhalation rates. *J. Hazard. Mater.* 2020, 393, 122344. <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2020.122344>
4. Paiva, I.; Marques, R.; Santos, M.; Reis, M.; Prudencio, M.I.; Waerenborgh, J.C.; Pinto, R. Naturally occurring radioactive material and risk assessment of tailings of polymetallic and Ra/U mines from legacy sites. *Chemosphere* 2019, 223, 171–179. <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2019.02.057>
5. Thejas, H.K.; Hossiney, N. A short review on environmental impacts and application of iron ore tailings in development of sustainable eco-friendly bricks. *Mater. Today Proc.* 2022, 61, 327–331. <http://dx.doi.org/10.21203/rs.3.rs-2784199/v1>
6. Araujo, F.S.; Tabora-Llano, I.; Nunes, E.B.; Santos, R.M. Recycling and reuse of mine tailings: A review of advancements and their implications. *Geosciences* 2022, 12, 319. <https://doi.org/10.3390/geosciences12090319>
7. Kinnunen, P.; Karhu, M.; Yli-Rantala, E.; Kivikytö-Reponen, P.; Mäkinen, J. A review of circular economy strategies for mine tailings. *Clean. Eng. Technol.* 2022, 8, 100499. <https://doi.org/10.1016/j.clet.2022.100499>
8. Phillip, E.; Choo, T.F.; Khairuddin, N.W.A.; Abdel Rahman, R.O. On the Sustainable Utilization of Geopolymers for Safe Management of Radioactive Waste: A Review. *Sustainability* 2023, 15, 1117. <https://doi.org/10.3390/su15021117>
9. Носовський А. В., Бондар Б. М. Дозиметрія та захист від іонізуючого випромінювання. Київ : Інститут проблем АЕС НАН України, 2020. 406 с.
10. Технічне рішення – 2021-16.001-ТР. «Переміщення «окремо розташованих» та «легко переміщуваних» об'єктів з території колишнього ВО «ПХЗ» на майданчик тимчасового зберігання упаковок з РЗМ та вимоги до експлуатації майданчика тимчасового зберігання упаковок з РЗМ». 2021, с.98.
11. Ten Years of Remediation Efforts in Japan. Out comes of the Four IAEA-MOE Expert Meetings on Environmental Recovery of Off-Site Areas Affected by the Fukushima Daiichi Accident, IAEA, Vienna, 2023, pp. 194, веб-сайт. URL: <https://www.iaea.org/publications/15193/ten-years-of-remediation-efforts-in-japan>
12. The Atomic Energy Society of Japan, веб-сайт. URL: [https://www.aesj.net/publish/fukushima\\_insights\\_intro](https://www.aesj.net/publish/fukushima_insights_intro)
13. International Atomic Energy Agency, IAEA Safety Glossary: 2018 Edition, IAEA, Vienna (2019), веб-сайт. URL: <https://www.iaea.org/publications/11098/iaea-safety-glossary-2018-edition>