

**МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ  
НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ БІОРЕСУРСІВ  
І ПРИРОДОКОРИСТУВАННЯ УКРАЇНИ**



**ЛАВРОВА ТЕТЯНА ВАЛЕРІЇВНА**

УДК 502.175:[661.879:502.174

**РАДІОЕКОЛОГІЧНИЙ МОНІТОРИНГ  
МАЙДАНЧИКІВ СПАДЩИНИ УРАНОВОГО ВИРОБНИЦТВА**

03.00.01 «Радіобіологія»

Автореферат дисертації на здобуття наукового ступеня  
кандидата біологічних наук

Київ – 2023

Дисертацією є кваліфікаційна наукова праця на правах рукопису

Роботу виконано в Українському гідрометеорологічному інституті  
ДСНС України і НАН України

**Науковий керівник** кандидат географічних наук  
**ВОЙЦЕХОВИЧ Олег Вадимович**,  
Український гідрометеорологічний інститут  
ДСНС України і НАН України,  
завідувач відділу радіаційного моніторингу  
природного середовища

**Офіційні опоненти:** доктор біологічних наук, професор  
**ПАВЛЕНКО Тетяна Олександрівна**,  
ДУ «Інститут громадського здоров'я  
імені О. М. Марзєєва НАМН України,  
завідуюча лабораторією радіаційного захисту

кандидат біологічних наук  
**БЕРКОВСЬКИЙ Володимир Борисович**,  
ДУ «Національний науковий центр  
радіаційної медицини НАМН України»,  
завідувач лабораторії дозиметрії  
внутрішнього опромінення

Захист відбудеться «29» грудня 2023 року о 10<sup>00</sup> годині на засіданні спеціалізованої вченої ради Д 26.004.08 у Національному університеті біоресурсів і природокористування України за адресою: 03041, м. Київ, вул. Героїв Оборони, 15, навчальний корпус № 3, кімната 301

З дисертацією можна ознайомитися в науковій бібліотеці Національного університету біоресурсів і природокористування України за адресою: 03041, м. Київ, вул. Героїв Оборони, 13, навчальний корпус № 4, кімната 41а

Автореферат розіслано «28» листопада 2023 року

Вчений секретар  
спеціалізованої вченої ради



Валерій ЦВІЛХОВСЬКИЙ

## ЗАГАЛЬНА ХАРАКТЕРИСТИКА РОБОТИ

**Актуальність теми.** Розвиток атомної енергетики в Україні тісно пов'язаний із функціонуванням підприємств із видобутку та переробки уранових руд. Одним із таких підприємств було виробниче об'єднання «Придніпровський хімічний завод» (ВО «ПХЗ») (м. Кам'янське, Дніпропетровська обл.). На цьому підприємстві протягом тривалого часу (1947–1991 рр.) виробляли уранові концентрати із руд, які видобували в Україні, Центральній Європі та країнах Центральної Азії. Однак після зупинення підприємства не було дотримано належних процедур щодо виведення радіаційно небезпечних об'єктів із експлуатації (Коровін Ю. Ф., 2017). Це призвело до того, що територія майданчика ВО «ПХЗ», а також об'єкти його колишньої інфраструктури стали джерелами радіаційного і хімічного забруднення природного середовища і потенційного опромінення населення. Ці об'єкти за міжнародними нормами радіаційної безпеки віднесено до категорії «уранової спадщини» (IAEA, GSR Part 3). Приведення їх у безпечний стан потребує системного аналізу стану безпеки на основі впровадження комплексного об'єктового радіоекологічного моніторингу (IAEA SRS 27, 2002, MB 6.6.1.2.6-00.06, 2006). Загальні наукові засади розвитку програм радіоекологічного моніторингу на територіях та об'єктах забруднення техногенними і природними радіонуклідами були предметом досліджень Б. С. Прістера (1997, 2003), Г. Г. Полікарпова (2001), М. Г. Бузинного (2005, 2010), В. О. Шумлянського (2007), І. М. Гудкова (2018) та інших. Програми і методи спостережень на об'єктах спадщини уранових виробництв, які набули розвитку в країнах ЄС, США, Канади й інших як інструменти обґрунтування і здійснення ефективних заходів відновлення їхньої безпеки, було висвітлено у дослідженнях Н. Biesold (2001), F. Carvalho (2003), P. Schmidt (2008), R. Avila (2013) і багатьох інших авторів. Дослідження окремих елементів довкілля на майданчику ВО «ПХЗ» виконувалися в роботах Ю. М. Сороки (2020), Д. О. Бугая (2014, 2023), Ю. В. Хомутиніна (2011) та інших. Це дало змогу на основі удосконалення існуючих і розроблення нових методичних засад провести багаторічні комплексні і системні дослідження радіоекологічного стану майданчиків колишнього ВО «ПХЗ» загалом. На основі результатів аналізу отриманих даних з ідентифікації джерел радіаційної небезпеки, оцінки можливих шляхів перенесення забруднюючих речовин, впливів на опромінення персоналу, населення міста й довкілля було обґрунтовано підходи і принципи організації програм комплексного радіоекологічного моніторингу для майданчиків уранової спадщини на всіх етапах їхнього життєвого циклу, що є науковою та практичною проблемою.

**Зв'язок роботи з науковими програмами, планами, темами.** Дисертацію виконано відповідно до статутних завдань Українського гідрометеорологічного інституту ДСНС України і НАН України у відділі радіаційного моніторингу природного середовища, а також у межах міжнародних проєктів за науково-дослідними роботами: «Науковий супровід радіаційного моніторингу природного середовища на мережі спостережень гідрометслужби та розвиток технологічних засад радіо-спектрометричних

і радіохімічних спостережень (номер державної реєстрації 0106U007587, 2006–2008); «Науковий супровід комплексних спостережень за радіоактивністю в навколишньому природному середовищі. Розділ 3. «Розвиток методичного забезпечення аналітичних вимірювань вмісту U, Ra, Th, Po у природному середовищі методами  $\alpha$ -,  $\gamma$ - та рідинно-сцинтиляційної спектрометрії» (номер державної реєстрації 0109U004891, 2009–2011); «Розвиток, адаптація і впровадження сучасних аналітичних методів і технологій визначення радіонуклідів широкого спектру у природному середовищі» (номер державної реєстрації 0112U004649, 2012–2014).

**Мета та завдання дослідження.** Мета дисертації – наукове обґрунтування методів радіоекологічного моніторингу промислових майданчиків і природного середовища зон впливу об'єктів спадщини уранового виробництва.

Для досягнення поставленої мети було вирішено такі завдання:

- розробити програму досліджень рівнів забруднення майданчиків спадщини уранового виробництва ВО «ПХЗ» радіонуклідами U-Th рядів у межах комплексного радіоекологічного моніторингу навколишнього середовища;

- визначити рівні забруднення основних радіаційно-небезпечних джерел спадщини уранового виробництва ВО «ПХЗ» та їхній вплив на навколишнє середовище (грунт, повітря, вода), які формують основні шляхи опромінення;

- проаналізувати тренди формування забруднення ґрунтів, атмосферного повітря, поверхневих і підземних вод;

- визначити величину та закономірності формування доз опромінення працівників підприємств, розташованих на території ВО «ПХЗ» та персоналу, який буде залучено до здійснення заходів приведення майданчика у безпечний стан;

- оцінити можливі ризики опромінення біоти, обумовлені радіоактивним забрудненням довкілля для наземних і водних екосистем;

- розробити методичні рекомендації щодо програм комплексного радіоекологічного моніторингу для впровадження у практичній діяльності операторів радіаційного контролю майданчиків уранової спадщини.

*Об'єкт дослідження* – радіоактивні залишки переробки уранових руд на об'єктах спадщини уранового виробництва «Придніпровський хімічний завод», а також природне середовище й елементи екосистеми в зоні їх радіологічного впливу.

*Предмет дослідження* – методичні підходи до організації та аналітичного супроводу програм комплексного радіоекологічного моніторингу довкілля як елемента системи управління радіаційною і екологічною безпекою; процеси та фактори, що визначають характеристики й динаміку формування забруднення довкілля, а також оцінки радіологічних впливів (доз опромінення персоналу, населення і біоти), як основного елемента обґрунтування заходів приведення територій у безпечний стан.

**Методи дослідження.** Для виконання поставлених завдань застосовували теоретичні та емпіричні методи екологічних досліджень, сучасні польові й аналітичні методи вивчення радіоактивного забруднення довкілля, аналітичні

розрахунки радіоекологічних впливів, просторового аналізу забруднення довкілля із використанням ГІС-технологій. Визначення вмісту природних радіонуклідів у пробах природного середовища виконано із застосуванням методів  $\alpha$ -,  $\beta$ -радіометрії, рідинно-сцинтиляційного лічення,  $\alpha$ - і  $\gamma$ -спектрометрії; вміст металів методами атомно-абсорбційного та рентген-флуоресцентного спектрального аналізу. Обробку результатів досліджень виконано із використанням стандартних методів статистичного аналізу. Для оцінки доз опромінення людей і біологічних об'єктів використано методи, рекомендовані МКРЗ та сучасні моделюючі системи: «ECOLEGO», «NORMALYZA» і «ERICA».

**Наукова новизна одержаних результатів.** Вперше проведено комплексні дослідження вмісту радіонуклідів уранового ряду в абіотичних і біотичних компонентах довкілля в зоні впливу колишнього уранового виробництва ВО «ПХЗ». Вперше виконано аналіз та визначено динаміку забруднення довкілля природними радіонуклідами в техногенно підвищених концентраціях, а також визначено пріоритетні шляхи формування доз опромінення персоналу і населення, надано оцінки радіаційних ризиків біоти наземних і водних екосистем.

Вперше вказано на відсутність значного впливу радіоактивних залишків уранового виробництва ВО «ПХЗ» на опромінення населення міста внаслідок перенесення аерозольних часток і  $^{222}\text{Rn}$  за його межі. Встановлено, що основним фактором винесення радіонуклідів за межі водозборів майданчика ВО «ПХЗ» є стік поверхневих вод. Доведено, що стік радіонуклідів уранового ряду з водами р. Коноплянки у Дніпровське водосховище складає менше 1 % від їхнього загального природного річного стоку з водами р. Дніпро.

Вперше виконано оцінку радіоекологічних ризиків для біоти водної екосистеми р. Коноплянка, де спостерігаються підвищені рівні забруднення води і донних відкладів  $^{238}\text{U}$  і  $^{226}\text{Ra}$ . Встановлено, що потужності поглиненої дози опромінення для таксономічних груп організмів у сучасних умовах не перевищують референтні рівні.

Вперше визначено, що вміст радіонуклідів  $^{238}\text{U}$  і  $^{226}\text{Ra}$  у біомасі дерев із хвостосховищ залишків уранового виробництва не перевищує рівні безпечного поводження з деревиною за санітарних рубок, обмеженню підлягають зольні залишки такої деревини у разі її спалювання.

Удосконалено програми комплексного радіоекологічного моніторингу на майданчиках спадщини уранових виробництв. Доведено, що застосування комплексного підходу в обґрунтуванні програм моніторингу й оптимізація методів для їх вирішення на різних етапах здійснення реабілітаційних заходів є необхідним інструментом відновлення стану безпеки майданчиків уранової спадщини.

**Практичне значення одержаних результатів.** Визначені закономірності та тренди формування рівнів забруднення навколишнього середовища і біоти є підґрунтям для оцінювання доз опромінення персоналу й населення на різних етапах ремедіації майданчика ВО «ПХЗ».

Методичні напрацювання з організації радіаційного моніторингу на території уранових об'єктів увійшли до Методичних вказівок «Радіаційно-гігієнічне регламентування проведення робіт на об'єктах ліквідованого Придніпровського хімічного заводу (ПХЗ)», які затверджено Міністерством охорони здоров'я України. Результати досліджень, покладені в основу програми радіаційного моніторингу, були впроваджені в практику виробничої діяльності ДП «Бар'єр», оператора радіаційно-небезпечних об'єктів колишнього ВО «ПХЗ». Розроблені методики виконання вимірювань із використанням методів низькофонової  $\alpha$ -,  $\beta$ -радіометрії запроваджено в програмах моніторингу довкілля в підрозділах національної гідрометеорологічної служби ДСНС України.

Отримані результати дослідження використано для верифікації і параметризації математичних моделей перенесення  $^{222}\text{Rn}$ , радіонуклідів із аерозолями, підземними і поверхневими водами від радіаційно-небезпечних об'єктів колишнього ВО «ПХЗ» для оцінок прогнозного поширення забруднення. Узагальнені результати дослідження стали підґрунтям на етапі підготовки звіту з «Аналізу безпеки і обґрунтування заходів приведення майданчика у безпечний стан» у межах виконання проєкту ЄС (Europe/Aid/134871/C/C/SER/UA).

**Особистий внесок здобувача** полягає у безпосередній участі в розробках програм і методів дослідження, а саме: адаптації, тестуванні і практичному застосуванні сучасних методик визначення радіонуклідів уранового ряду гамма- і альфа-спектрометричним, рідинно-сцинтиляційним ліченням та іншими методами в абіотичних і біологічних компонентах природного середовища. Авторка брала безпосередню участь у плануванні та відборі проб, проводила аналітичні вимірювання вмісту радіонуклідів і хімічних забруднювачів, а також виконувала аналіз результатів, розрахунки доз і ризиків, здійснювала узагальнення матеріалів досліджень, підготувала наукові статі. Основні результати отримано самостійно.

**Апробація результатів дисертації.** Основні результати дослідження доповідалися та обговорювалися на міжнародних конференціях та форумах, зокрема таких як: «Isotopes in Environmental Studies, Aquatic Forum 2004» (Монте-Карло, Монако, 2004 р.); «Environmental Remediation and Radioactive Waste Management, ICSEM2007» (м. Брюгге, Бельгія, 2007 р.); «Remediation of Land Contaminated by Radioactive Material Residues» (м. Астана, Казахстан, 2009 р.); «Protection Against Radon at Home and at Work» (м. Прага, Чехія, 2010 р.); «Harmonisation within Atmospheric Dispersion Modelling for Regulatory Purposes» (м. Мадрид, Іспанія, 2013 р.); «Eighth International Symposium Naturally occurring Radioactive materials» (м. Піо-де-Жанейро, Бразилія, 2016 р.); «Network of Analytical Laboratories for Measurement of Environment Radioactivity» (м. Амман, Йорданія, 2018 р.); «Uranium Raw Material for the Nuclear Fuel Cycle, URAM-2018» (м. Відень, Австрія, 2018 р.); щорічних наукових конференціях Інституту ядерних досліджень НАН України (м. Київ, 2015–2020 рр.); Всеукраїнській науковій конференції «Проблеми гідрології, гідрохімії, гідроекології» (м. Київ, 2018 р.).

**Публікації.** За темою дисертації опубліковано у 28 наукових працях, з яких 7 статей у наукових виданнях, включених до категорії «А» Переліку наукових фахових видань України, та/або наукових періодичних виданнях, проіндексованих у базах даних Web of Science Core Collection та/або Scopus, 8 статей в інших наукових виданнях, методичні вказівки, 12 матеріалів та тез наукових доповідей.

**Структура та обсяг дисертації.** Дисертація складається з анотації, вступу, п'яти розділів, висновків, списку використаних джерел і додатків. Загальний обсяг роботи становить 226 сторінок. Робота містить 20 таблиць і 42 рисунки. Список використаних джерел нараховує 162 найменування, зокрема 44 латиницею.

## ОСНОВНИЙ ЗМІСТ РОБОТИ

**Аналітичний огляд проблеми.** У розділі висвітлюються основні сучасні уявлення про стан об'єктів уранової спадщини, методи вивчення проблеми, а також відомості про технології видобутку і переробки уранових руд в Україні, які визначають характеристики емісії радіонуклідів уранового ряду та їхні впливи на елементи довкілля; визначено основні природні процеси, що сприяють розповсюдженню і формуванню забруднення природного середовища: вітровий підйом і перенесення часток пилу (аерозолів) з поверхні забруднених територій під впливом метеорологічних процесів; водні шляхи виносу радіоактивних елементів з водозборів під впливом поверхневого і підземного стоку; основні фактори формування опромінення людей; огляд типових радіологічних впливів на біоту наземних і водних екосистем. Надаються базові відомості про радіологічні й екологічні критерії радіаційної безпеки щодо приведення майданчиків уранової спадщини у безпечний стан.

**Матеріали і методи дослідження.** Дослідження з оцінки стану забруднення наземних і водних екосистем радіонуклідами природного походження уранового ряду ( $^{238}\text{U}$ ,  $^{234}\text{U}$ ,  $^{230}\text{Th}$ ,  $^{226}\text{Ra}$ ,  $^{210}\text{Pb}$ ,  $^{210}\text{Po}$ ,  $^{222}\text{Rn}$ ) і хімічними елементами (As, Ba, Cd, Cu, Fe, Ni, Mn, Se, V) виконано на території майданчика колишнього ВО «ПХЗ», природних зонах його впливу, а також ділянках фонових спостережень у період 2005–2021 рр. Для вивчення стану забруднення території за показниками зовнішнього гамма-випромінювання застосовували радіометри-дозиметри ДКС-96 у поєднанні із супутниковою навігаційною системою (Garmin-GPS-60). Для характеристики стану майданчика вивчено вертикальну структуру радіаційного і хімічного забруднення ґрунтів. Проби ґрунту відбиралися на глибину 0–30 см, із застосуванням геологічних бурів і шнекових відбірників від 30 см до 1 м і глибше із поділом на характерні за типом ґрунту шари 5–10 см. Для оцінки забруднення колишніх виробничих приміщень відбір проб планували за результатами гамма-дозиметричних зйомок. Зразки відбирали із місць накопичення мінеральних залишків ( $n=50$ ), мазками на поверхні обладнання і приміщень ( $n=25$ ), через відбір аерозолів повітря фільтруючими пристроями із потоком прокачування до  $1\text{ м}^3\cdot\text{хв}^{-1}$  у робочих приміщеннях ( $n=10$ ). Для оцінки об'ємної активності (ОА) радіоактивних

аерозолів і аерозольних випадінь ( $n=200$ ) в зонах впливу 5 хвостосховищ були встановлені ізокінетичні фільтруючі повітря прилади та планшети радіоактивних випадінь відповідно до (ДСТУ ISO 2889-2001). За таким же методом виконували спостереження на найбільш забруднених ділянках промислової території майданчика ВО «ПХЗ» і в населених пунктах зони впливу (Таромське) і м. Кам'янське (метеостанція). Для оцінки активності  $^{222}\text{Rn}$  на цих майданчиках узагальнено результати визначення ОА  $^{222}\text{Rn}$  у повітрі, які отримано за методикою пасивної трекової радіометрії (МБК 6.6.2.-063-2000) із періодом накопичення 30 діб ( $n=600$ ), визначення ОА  $^{222}\text{Rn}$  у ґрунті ( $n=30$ ) за методикою М. Г. Бузинного (2008), а також ексхалєції  $^{222}\text{Rn}$  з поверхні ґрунту ( $n=600$ ), як індикатора цілісності захисного покриття хвостосховищ, визначеної з використання вугільних накопичувачів. Програма відбору проб підземних вод здійснювалася відповідно до рекомендацій, розроблених О. С. Скальським (2010) на 15 спостережуваних свердловинах майданчику ( $n=170$ ), поверхневих проб на 5 пунктах спостережень р. Дніпро, р. Коноплянка ( $n=65$ ) за настановами ДСТУ ISO 5667-6:2009. Донні відклади в р. Коноплянка і Дніпровському водосховищі відбиралися і готувалися до аналізу згідно з методичними рекомендаціями (Войцехович О. В., Канівець В. В., 2001). Відбір проб риби та їх підготовку до аналізу виконано відповідно до методичних підходів, викладених у роботі О. Є. Каглян (2011). Умови проведення досліджень відповідали вимогам Закону України «Про захист тварин від жорстокого поводження» від 21.02.2006 р. № 3447-IV в редакції від 04.08.2017 р.

Активність радіонуклідів U-ряду в ґрунтах, аерозолях, рослинах визначали за методом гамма-спектрометрії згідно з ДСТУ ISO 18589-3:2010 і методичними рекомендаціями (Костеж А. Б. та інші, 2011) із використанням гамма-спектрометричних напівпровідникових детекторів типу GWL, GMX (Ortec), BEGe (Canberra). Для уточнення активності контрольних проб серед тих, що вимірювалися методами гамма-спектрометрії використано альфа-спектрометричний метод із застосуванням атестованих методик визначення альфа-випромінюючих радіонуклідів  $^{238, 234}\text{U}$ ,  $^{232, 230, 228}\text{Th}$ ,  $^{210}\text{Pb}$  і  $^{210}\text{Po}$  і радіохімічною підготовкою проб ґрунтів, рослин, риби (78-U-П/99-03, 78-Th-П/03, 20-Po-П/03). Для проб підземних і поверхневих вод використовували методики (78-U-B/99-03, 20-Th-B/03, 70-Po-B/01-03). Вимірювання підготовлених зразків виконано на альфа-спектрометрі СЕА-01 та альфа-бета-радіометрі зі спектрометричною платою УМФ-2000. Як основний метод для оцінки сумарної альфа- і бета-активності вод, а також питомої активності суми ізотопів урану та  $^{226}\text{Ra}$  у воді використано рідинно-сцинтиляційний метод (Бузинний М. Г., 2005, 2012) і альфа-бета-рідинно-сцинтиляційні спектрометри Triathler (Hidex), Tri-Carb 2900 (Perkin Elmer). Хімічний склад поверхневих і підземних вод визначали за стандартними методиками (Набиванець Б. Й. та ін., 2007). Вміст металів в аерозолях ( $n=10$ ) досліджували методами атомно-абсорбційної (ДСТУ ISO 15586:2003) та рентген-флуоресцентної спектрометрії за методикою M049-П/02 ( $n=50$ ). Статистичну оцінку результатів виконано методами варіаційної статистики за допомогою комп'ютерних програм у редакторі Microsoft Excel 2016. Для оцінки доз опромінення людей



і біологічних об'єктів використано рекомендовані дозиметричні моделі й дозові коефіцієнти, адаптовані для майданчиків уранової спадщини WISMUT (ВМУ, 1999 із коригуваннями 2013 р.) та сучасні моделюючі системи для радіоекологічного аналізу: «ECOLEGO», «NORMALYZA» і «ERICA».

## РЕЗУЛЬТАТИ ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНИХ ДОСЛІДЖЕНЬ ТА ЇХ ОБГОВОРЕННЯ

Структура викладення матеріалів відповідає послідовності етапів проведеного дослідження та організації програм об'єктового радіоекологічного моніторингу на етапі планування реабілітаційних заходів.

**Радіологічна характеристика майданчика ВО «ПХЗ».** Дослідженнями встановлено, що просторова неоднорідність забруднення всієї території колишнього ВО «ПХЗ», території окремих хвостосховищ сформовано різними джерелами накопичення залишків уранового виробництва на майданчику залежно від певного етапу технологічного циклу, станом захисних екранів на поверхні хвостосховищ і визначається в широкому діапазоні потужності амбієнтного еквівалента дози (ПАЕД) гамма-випромінювання від фонового на рівні  $0,2 \text{ мкЗв}\cdot\text{год}^{-1}$  до високих рівнів забруднення (вище  $1,0 \text{ мкЗв}\cdot\text{год}^{-1}$ ). Оцінка просторового забруднення території майданчика виконана із застосуванням геостатистичного підходу з можливістю просторового зображення результатів у вигляді картосхем (приклад на рис. 1а.).

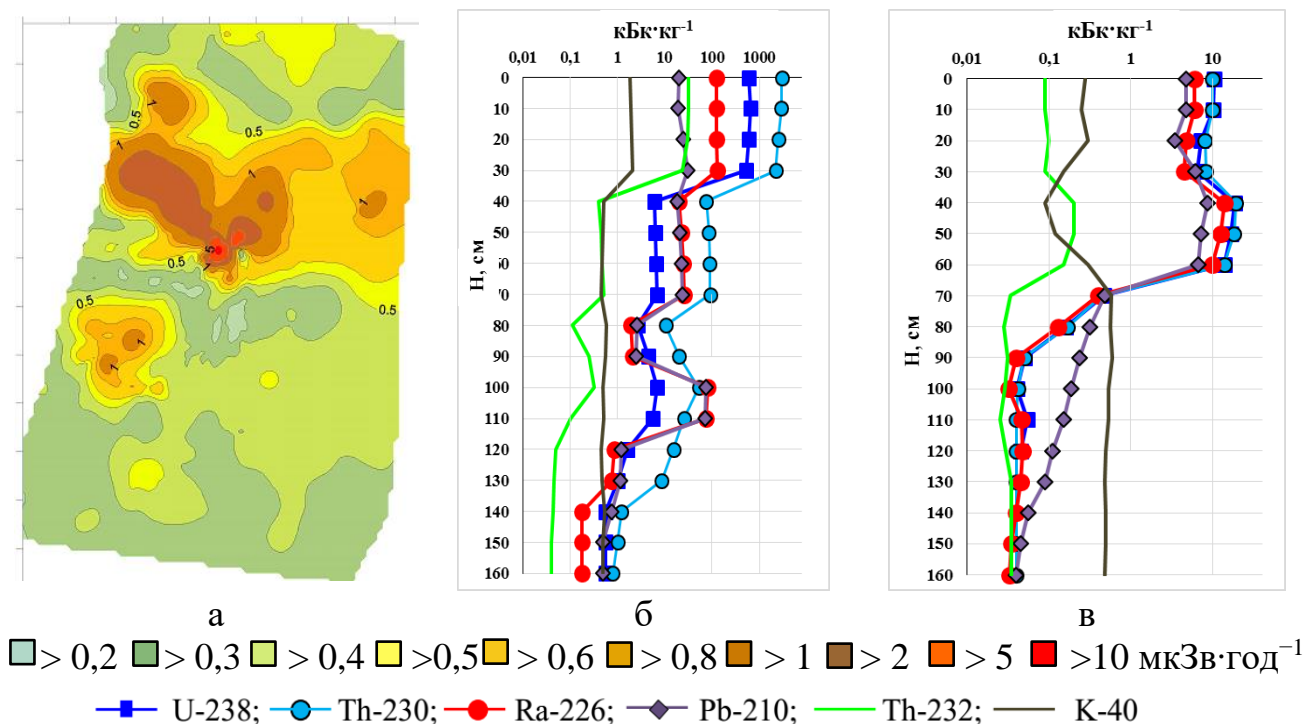


Рис. 1. Карта ПАЕД гамма-випромінювання на поверхні хвостосховища «Центральний Яр» (а) і характерні типи вертикального розподілу радіонуклідів у ґрунтах майданчика, де (б) – на ділянках переробки уранових руд; (в) – на ділянках накопичення залишків рудних матеріалів

Встановлено, що площі територій, які підлягають ремедіації, де рівні ПАЕД  $>0,50$  мкЗв·год<sup>-1</sup> складають до 30 % усієї території, з яких 5 % території (близько 0,04 км<sup>2</sup>) із високим рівнем забруднення –  $>10$  мкЗв·год<sup>-1</sup>, що підлягають обов'язковому очищенню. Найбільш забрудненими (ПАЕД 10–30 мкЗв·год<sup>-1</sup>) є ділянки навколо будівель U-виробництва, аварійних розливів, несанкціонованих скидів. Максимальні рівні ПАЕД (до 1,5 мЗв·год<sup>-1</sup>) виявлено в цехах колишніх будівель з екстракції урану і торієвого очищення.

Дослідження структури і характеру забруднення шарів ґрунту й аналіз одержаних результатів показали, що розподіл радіонуклідів уранового ряду залежить від типу радіоактивних залишків уранового виробництва залежно від певних технологічних циклів виробництва. Виявлено два основних типи забруднення від походження матеріалів: рудне з рівноважним співвідношенням активності <sup>238</sup>U, <sup>226</sup>Ra і <sup>230</sup>Th (див. рис. 1 в) і технологічно змінене з нерівноважним співвідношенням їх активності (див. рис. 1 б).

Встановлено, що найбільш високі рівні забруднення ґрунтів до глибин 1,5 м є характерними на ділянках утримання рудних матеріалів і розміщення колишніх цехів екстракції урану, технологічних споруд з очищення технологічних вод і місцях накопичення рудних залишків, що містять уран (див. рис. 1 б і 1 в). На більшості ділянок майданчика вміст радіонуклідів уранового ряду в товщі ґрунтів на глибинах більше 1,5 м наближається до фонових значень, що свідчить про мінімальний вплив ґрунтів на формування забруднення підземних вод.

Рівноважні співвідношення між активністю радіонуклідів уранового ряду також є характерними на умовно «чистих» ділянках, де їхня активність до 2 разів вище фону (30 Бк·кг<sup>-1</sup>) за межами об'єкта досліджень. На більшості забруднених ділянок майданчика активність радіонуклідів уранового ряду є вищою за рівні звільнення матеріалів від регулюючого контролю 1 кБк·кг<sup>-1</sup>, залежать від типу руд, змінюється в діапазоні від 3–5 кБк·кг<sup>-1</sup> до 1000 кБк·кг<sup>-1</sup> і вище.

На ділянках, забруднених залишками переробки уранових руд, у структурі забруднення ґрунтів є домінуванням дочірніх продуктів розпаду урану <sup>230</sup>Th  $>$  <sup>226</sup>Ra  $>$  <sup>210</sup>Pb. Для ділянок навколо об'єктів виробництва торієвої очистки концентратів найбільші рівні вмісту <sup>230</sup>Th визначено до 3 МБк·кг<sup>-1</sup>. На ділянках для радієвого очищення концентратів максимальні рівні активності <sup>226</sup>Ra у поверхневому шарі ґрунту коливаються в діапазоні від 600 до 9 МБк·кг<sup>-1</sup>. Максимальна активність ізотопів U становить близько 3,2 МБк·кг<sup>-1</sup> і виявляється на ділянках біля цехів виробництва готової продукції. Саме такі ділянки є джерелами опромінення і підлягають дезактивації після консервації забруднених будівель.

Встановлено, що в розсипних матеріалах у деяких будівлях вміст радіоактивних залишків уранового виробництва є найбільш небезпечним у формуванні зовнішнього гамма-опромінення, а також опромінення по інгаляційних шляхах. Частотний розподіл концентрацій активності радіонуклідів уранового ряду відповідає певному технологічному циклу і має логнормальний характер із середньгеометричним значенням розподілу ( $\bar{X}$ )

і геометричним стандартним відхиленням ( $\varepsilon_{\text{геом}}$ ): для цехів будівлі уранового очищення  $^{238}\text{U}$  – 33,6 (4,7) кБк·кг<sup>-1</sup>;  $^{226}\text{Ra}$  – 12,9 (2,7) кБк·кг<sup>-1</sup>;  $^{210}\text{Pb}$ ,  $^{210}\text{Po}$  – 7,2 (2,7) кБк·кг<sup>-1</sup>;  $^{230}\text{Th}$  – 21,6 (2,8) кБк·кг<sup>-1</sup>;  $^{232}\text{Th}$  – 0,3 (2,5) кБк·кг<sup>-1</sup>; для цехів будівлі торієвого очищення –  $^{238}\text{U}$  – 0,9 (2,2) кБк·кг<sup>-1</sup>;  $^{226}\text{Ra}$  – 9,1 (2,3) кБк·кг<sup>-1</sup>;  $^{210}\text{Pb}$ ,  $^{210}\text{Po}$  – 10,0 (2,2) кБк·кг<sup>-1</sup>;  $^{230}\text{Th}$  – 180 (2,3) кБк·кг<sup>-1</sup>;  $^{232}\text{Th}$  – 2,3 (1,9) кБк·кг<sup>-1</sup>.

Доведено, що високий вміст металів у ґрунтах майданчика відповідає місцям накопичення поліметалічних руд (сумарний коефіцієнт концентрування (СКК) становить 70–120, порівнюючи з фоновим (СКК – 16) і місцями очистки технологічних вод (СКК – 55–70). Найбільші рівні забруднення і кількість різних видів металів виявлено у місцях з несанкціонованими скиданнями залишків уранового виробництва (СКК визначено на рівні 320–670). Встановлено, що в хімічному забрудненні ґрунтів рудними залишками серед металів домінують Y ( $C_i/C_{\text{ф}} = 15\text{--}40$ ), As ( $C_i/C_{\text{ф}} = 5\text{--}25$ ), Sr ( $C_i/C_{\text{ф}} = 6\text{--}20$ ), Zn ( $C_i/C_{\text{ф}} = 5\text{--}9$ ), Pb ( $C_i/C_{\text{ф}} = 2\text{--}5$ ), Mn ( $C_i/C_{\text{ф}} = 2\text{--}4$ ).

Забруднені радіонуклідами й металами поверхні ґрунту є джерелом формування забруднення поверхневих стоків з водозбірної території майданчика і джерелом емісії вітрового забруднення повітря радіоактивними та хімічно-забрудненими аерозолями.

#### **Оцінка забруднення повітря та його поширення за межі майданчика.**

Оцінку забруднення повітря радіоактивними аерозолями об'єктів дослідження проводили за результатами спостережень, які порівнювали із фоновими рівнями, розраховуючи інтегральний показник перевищення над фоном ( $C_i/C_{\text{ф}}$ ), а для оцінки стану забруднення – із допустимими концентраціями у повітрі  $\text{ДК}^{\text{inhal}}$  для певних категорій (НРБУ-97).

Виявлено, що протягом періодів ведення земляних робіт на поверхні хвостосховищ щільність випадань аерозолів, які містять  $^{238}\text{U}$  і  $^{226}\text{Ra}$ , зростала від 60 до 100 разів і від 40 до 150 разів, відповідно, а їх об'ємні концентрації в радіоактивних аерозолях повітря перевищували фонові до 200 разів і більше. За нормальних умов і відсутності вітрового підйому пилу забруднення повітря аерозолями на майданчику наближається до фонових значень (рис. 2).

За результатами спостережень і модельних розрахунків, які виконано з урахуванням типових метеорологічних характеристик, складної топографії на майданчику і для різних типів покриття для певних ділянок спільно із А. В. Халченков та ін. (2016) встановлено, що розповсюдження ареолу із максимальним аерозольним забрудненням може поширюватися у межах до 500 м від джерела вітрового підйому. Встановлено, що максимальні разові концентрації за умов найгіршого сценарію (швидкості вітру 12 м·с<sup>-1</sup>) для мешканців с. Таромське складають для  $^{226}\text{Ra}$  (найбільш вагомого дозоутворюючого радіонукліда) – 12,5 мкБк·м<sup>-3</sup>, що становить 0,4 % від  $\text{ДК}^{\text{inhal}}$  для населення 3 мБк·м<sup>-3</sup>.

Результати оцінки забруднення аерозолів також підтвердили високий рівень їхнього забруднення металами рудного походження. Встановлено, що найбільші рівні металів мають місце на територіях біля відкритих ділянок хвостосховищ зі значним впливом викидів інших гірсько-рудних виробництв міста (за переважним спектром металів в аерозолях), і перевищують фонові

концентрації в середньому від 2 до 10 разів, а у разі проведення земляних робіт до 30 разів від фонових значень і до 15 разів перевищують щільність фонових випадінь.

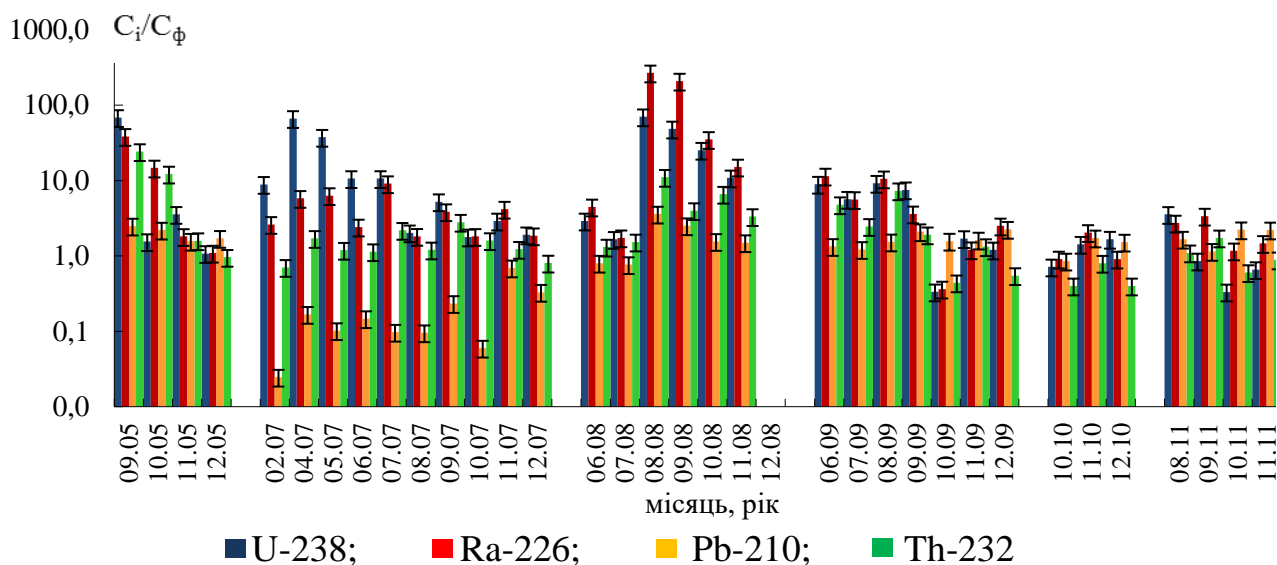


Рис. 2. Індекс ( $C_i/C_\phi$ ) забруднення атмосферного повітря (об'ємні активності радіонуклідів уранового ряду і  $^{232}\text{Th}$  в аерозолях) за періоди спостережень у районі хвостосховища «Південно-східне»; 08–11.2008 та 06–09.2009 періоди земляних робіт під час відновлення ґрунтового покриття на хвостосховищі

Важливим чинником радіаційного забруднення атмосферного повітря на території майданчиків уранових виробництв є радіоактивний газ  $^{222}\text{Rn}$  (дочірній елемент  $^{226}\text{Ra}$ ), обумовлений присутністю в ґрунтах  $^{226}\text{Ra}$  (природний чинник) і залишках виробництва (техногенний чинник). Тому визначення ОА  $^{222}\text{Rn}$  і еквівалентно рівноважної активності його дочірніх продуктів розпаду (ЕРОА), разом з оцінкою щільності його потоку з поверхні ґрунту стали складовими дослідження.

Аналіз багаторічних спостережень дав змогу встановити, що частотний розподіл рівнів ексхаляції  $^{222}\text{Rn}$  із поверхні ґрунтів має логнормальний характер: на фонових ділянках визначається на рівні  $63 \cdot 1,7^{\pm 1} \text{ мБк} \cdot \text{м}^{-2} \cdot \text{с}^{-1}$  із максимальним значенням –  $300 \text{ мБк} \cdot \text{м}^{-2} \cdot \text{с}^{-1}$ ; на рекультивованих ділянках хвостосховищ –  $80 \cdot 1,9^{\pm 1} \text{ мБк} \cdot \text{м}^{-2} \cdot \text{с}^{-1}$ , максимальним значенням –  $620 \text{ мБк} \cdot \text{м}^{-2} \cdot \text{с}^{-1}$ . На ділянках із поверхневим забрудненням рудними матеріалами або залишками виробництва та на ділянках із порушенням покриття на території хвостосховищ показник ексхаляції  $^{222}\text{Rn}$  варіює в широкому діапазоні: від 1,5 до  $100 \text{ Бк} \cdot \text{м}^{-2} \cdot \text{с}^{-1}$ , які перевищують  $1 \text{ Бк} \cdot \text{м}^{-2} \cdot \text{с}^{-1}$  (критерій достатнього рівня надійності захисного покриття). На прикладі аналізу залежності ексхаляції  $^{222}\text{Rn}$  від ПАЕД гамма-випромінювання на різних ділянках хвостосховища «Центральний яр» показано її можливі варіанти від дії різних факторів: поверхневого забруднення, заглибленого (внаслідок пошкодження захисних шарів покриття), зменшення щільності покриття (внаслідок життєдіяльності дерев'янистої рослинності,

розвиток кореневої системи якої може впливати на зменшення щільності покриття) (рис. 3).

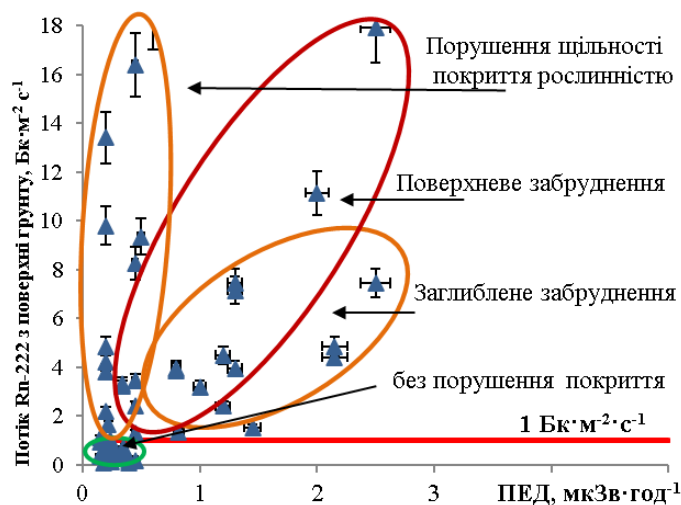


Рис. 3. Залежність ексхаляції  $^{222}\text{Rn}$  від ПАЕД гамма-випромінювання на різних ділянках хвостосховища «Центральний яр»

Аналізом даних встановлено, що значна варіабельність рівнів ексхаляції  $^{222}\text{Rn}$  на поверхні ґрунтів майданчика є суттєво залежною від характеристик проникності ґрунтового покриття хвостосховищ, активністю  $^{226}\text{Ra}$  в ґрунтах і тілі хвостосховищ, меншою мірою вона обумовлена метеорологічними умовами. Виявлені залежності враховувались на етапі математичного моделювання прогнозних оцінок поширення об'ємної активності радону (ОА) за межі майданчика. Для цього необхідною умовою є одночасне визначення як ексхаляції, так ОА  $^{222}\text{Rn}$ . У процесі дослідження встановлено оптимальний метод, що відповідає цим вимогам, – метод із застосуванням вугільних накопичувачів з одно- або п'ятиденним періодом накопичення.

Поряд із цим вивчалися рівні середньомісячної ОА  $^{222}\text{Rn}$  методом пасивної радонометрії), результати яких використовувались для оцінки доз опромінення. Встановлено, що ОА  $^{222}\text{Rn}$  у повітрі відкритого простору також змінювалася в широкому діапазоні значень – від 25 до 2500 Бк·м<sup>-3</sup> (еквівалентна рівноважна об'ємна активність ЕРОА 5–500 Бк·м<sup>-3</sup>, коефіцієнт рівноваги  $F = 0,2$ ) та за своїм частотним розподілом наближалася до нормального характеру із медіаною  $200 \pm 68$  Бк·м<sup>-3</sup>, що обумовлено процесами турбулентного перемішування повітряних мас. Кореляцію між ексхаляцією радону-222 та його об'ємною активністю в повітрі об'єктів не встановлено ( $r^2 = 0,35$ ,  $p < 0,05$ ). Показано, що нове покриття хвостосховищ призводить до зменшення ексхаляції радону від 10 до 100 разів із його поверхні, але не може суттєво впливати на зменшення ОА  $^{222}\text{Rn}$  у повітрі на його поверхні у тих випадках, коли ґрунти прилеглих до хвостосховищ територій є суттєво забрудненими  $^{226}\text{Ra}$ . Результати досліджень і виконані на їх основі моделювання (Kovalets I. et al., 2017) доводять про незначний вклад аерозольного шляху в поширення  $^{222}\text{Rn}$  за межі майданчика.

Це доводить, що інгаляційні шляхи опромінення від аерозольного забруднення і поширення ОА  $^{222}\text{Rn}$  у повітрі можуть бути суттєвими тільки для

персоналу, який працює на майданчику ВО «ПХЗ», та не створюють загрози для населення міста.

**Забруднення підземних і поверхневих вод.** Основним способом винесення забруднюючих речовин, що сформовані залишками уранового виробництва, за межі майданчика колишнього ВО «ПХЗ» є водний: внаслідок поверхневого змиву їх у водотоки і надходження інфільтраційних вод із тіла хвостосховищ у підземні води верхнього водоносного горизонту.

За результатами багаторічних спостережень встановлено, що основні ореоли забруднення підземних вод спостерігаються під тілом хвостосховищ і в алювіальному горизонті на відстані до 100–300 м від хвостосховищ за їх потоком у напрямі розвантаження в сторону р. Коноплянка. Води таких ореолів забруднення мають високий рівень мінералізації і високі концентрації активності радіонуклідів уранового ряду із домінуванням урану у вигляді сульфатних і карбонатних комплексів (від 5–10 Бк·дм<sup>-3</sup> до 1000 Бк·дм<sup>-3</sup> і вище).

Аналіз отриманих даних дозволив встановити кореляційний зв'язок ( $r^2=0,85$ ,  $p<0,05$ ) між ступенем мінералізації води і вмістом урану. Встановлено, що ізотопи урану (<sup>238,234</sup>U), об'ємна активність яких у 100 і більше разів перевищує об'ємну активність інших елементів уранового ряду (<sup>226</sup>Ra, <sup>210</sup>Pb, <sup>210</sup>Po), є домінуючими в підземних і поверхневих водах (складають до 95 % сумарної альфа-активності вод).

Найвищі рівні мінералізації та активності радіонуклідів, особливо ізоотопів урану, виявлено у водах техногенних горизонтів. Динаміку їхнього забруднення простежено на прикладі хвостосховищ «Західне» і «Дніпровське». Встановлено, що максимальні концентрації ізоотопів урану (1290 Бк·дм<sup>-3</sup> у 2005 р.) зменшилися до 128 Бк·дм<sup>-3</sup> у 2021 р. у хвостосховищі «Західне», і збільшилися від 80 Бк·дм<sup>-3</sup> у 2009 р. до 250 Бк·дм<sup>-3</sup> у 2017 р., або у 3 рази, у хвостосховищі «Дніпровське». Приклади просторового розподілу активності урану і домінуючих аніонів у підземних водах зони впливу хвостосховища «Дніпровське» показано на рис. 4.

Показники індексу хімічного забруднення (ІЗі/ІЗф) підземних вод у межах основного ореолу виносу із хвостосховищ перевищують фонові рівні у 20–40 разів, що відповідає класу «екстремально забруднених». Натомість на інших територіях майданчика (за межами впливу хвостосховищ) рівні забруднення вод алювіального горизонту є близькими до фонових для цієї промислової зони. Це свідчить про те, що основним джерелом надходження радіоактивних і хімічних забруднювачів з території майданчика уранової спадщини «ПХЗ» є і протягом дуже тривалого періоду будуть залишатися саме хвостосховища залишків уранового виробництва.

Водночас встановлено, що за останні 70 років з часу заповнення хвостосховищ «Західне» і «Центральний яр» ореол забруднених вод із високими концентраціями активності урану ( $>10$  Бк·дм<sup>-3</sup>) перемістився від хвостосховищ на відстань близько 300 м. Заміна покриття цих хвостосховищ на таке, що призупинить надходження атмосферних вод у тіло залишків переробки уранових руд, може зменшити темпи забруднення підземних вод і зменшити очікувані підвищені ризики радіаційних впливів на водну екосистему р. Коноплянка у майбутньому. Тому повне звільнення майданчика від регуляторного контролю

стане можливим тільки після надійного екранування хвостосховищ протифільтраційними бар'єрами або видалення із майданчика.

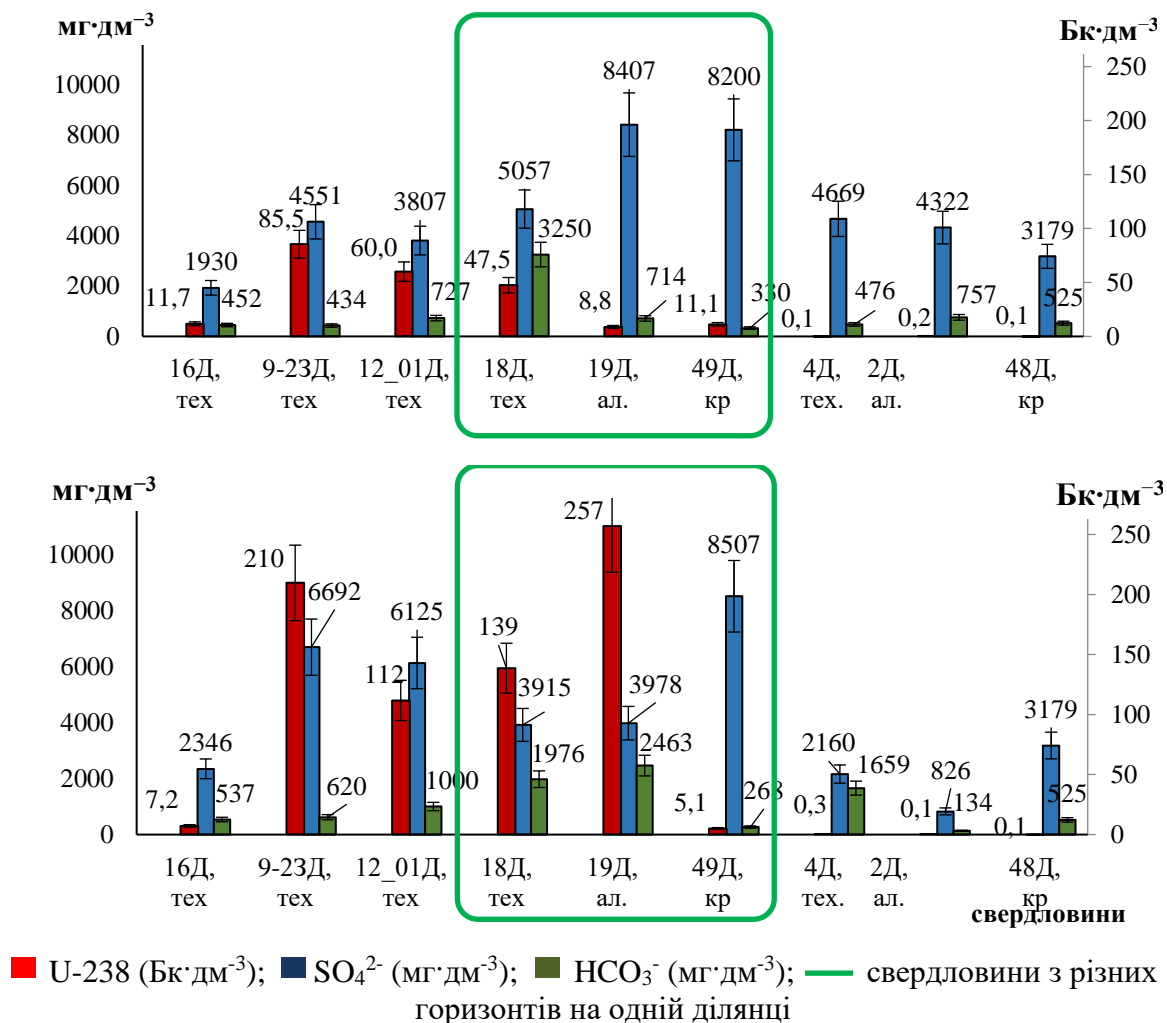


Рис. 4. Просторовий розподіл концентрацій активності урану та основних аніонів у техногенному (тех.) і алювіальному (ал.) водоносних горизонтах хвостосховища «Дніпровське», за даними 2009 р. (верхній рисунок) і 2021 р. (нижній рисунок)

Аналіз результатів досліджень вмісту <sup>238,234</sup>U, <sup>226</sup>Ra у водах річок зони впливу майданчика дозволяє оцінити його впливи на забруднення р. Коноплянка в межах ділянки формування поверхневого стоку з водозбірних територій майданчика. Виявлено, що об'ємна активність <sup>238,234</sup>U і <sup>226</sup>Ra у воді річки в зоні впливу поверхневих стоків майданчика може у 5–10 разів перевищувати фонові рівні для цього району, які визначені у межах 25±5 мБк·дм<sup>-3</sup> і 7±3 мБк·дм<sup>-3</sup> відповідно. У донних відкладах їх активність визначається в межах 25±5 Бк·кг<sup>-1</sup> і 40±8 Бк·кг<sup>-1</sup> відповідно. У воді р. Коноплянка радіонукліди уранового ряду з території майданчика також надходять із дренажними водами зливової каналізації і частково підземним стоком. Встановлені середньорічні величини об'ємної активності <sup>238,234</sup>U і <sup>226</sup>Ra в зоні витоку в р. Дніпро складають 320±130 мБк·дм<sup>-3</sup> і 45±15 мБк·дм<sup>-3</sup>, відповідно; у донних відкладах – 300±60 Бк·кг<sup>-1</sup> і 500±100 Бк·кг<sup>-1</sup>.

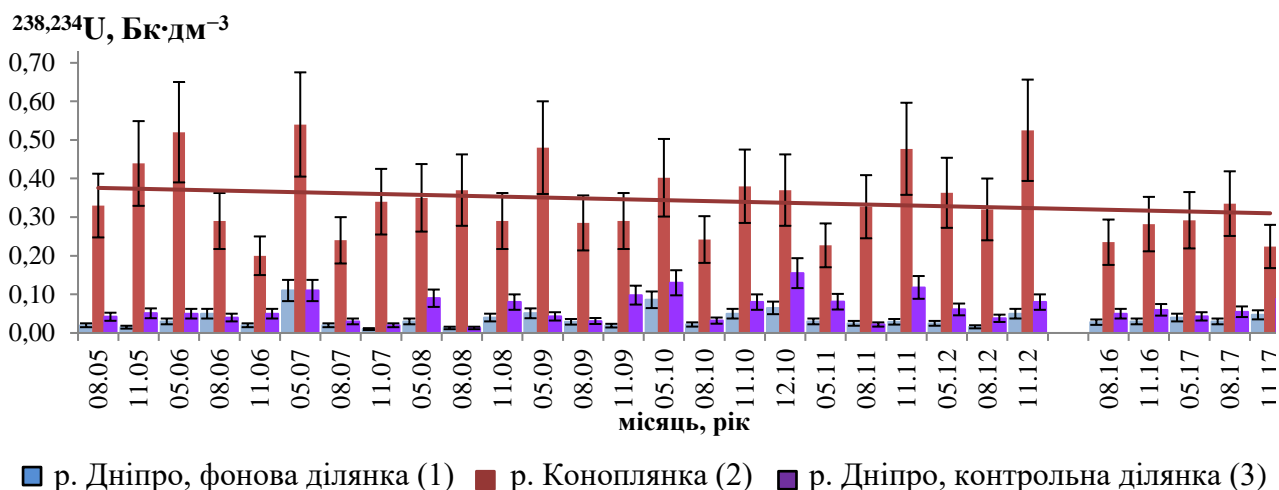


Рис. 5. Тренди формування забруднення вод р. Коноплянка ураном у зоні витоків в р. Дніпро (2), р. Дніпро на фоновій ділянці (1) та нижче 500 м гирла р. Коноплянка (3)

Показано, що стік забруднених вод р. Коноплянка ураном може збільшувати його усереднені об'ємні активності у водах р. Дніпро нижче за потіком зони впливу майданчика «ПХЗ» до 2 разів над фоном (до величин 0,03–0,09 Бк·дм<sup>-3</sup>). Водночас річний стік <sup>238,234</sup>U і <sup>226</sup>Ra з водами р. Коноплянка, порівнюючи з їх стоком водами р. Дніпро оцінюється співвідношенням 1:140 (12 ГБк і 1700 ГБк, відповідно, за даними спостережень 2012 р.). Тому сучасне надходження забруднених вод р. Коноплянка не має впливу на забруднення р. Дніпро.

#### **Вплив радіаційного забруднення на біоту наземних і водних екосистем.**

Визначені та проаналізовані значення питомої активності радіонуклідів уранового ряду в абіотичних компонентах природного середовища (верхньому шарі ґрунту, аерозолях повітря, поверхневих водах, донних відкладах) дали змогу виконати попередні оцінки впливу забруднення на біоту антропогенно змінених природних та штучних наземних і водних екосистем.

Здійснено розрахунки ймовірного накопичення радіонуклідів уранового ряду в різних групах референтних рослин і тварин та розрахунки доз зовнішнього і внутрішнього опромінення від радіонуклідів уранового ряду, зокрема <sup>226</sup>Ra і його коротко існуючих дочірніх радіонуклідів, а також надано оцінки ризиків негативного впливу радіоактивного забруднення довкілля на референтні види з обраних груп живих організмів. Як консервативний екологічно безпечний рівень опромінення застосовували міжнародні критерії впливу на репродуктивну спроможність організмів, а саме: референтний рівень потужності поглиненої дози опромінення 40 мкГр·год<sup>-1</sup> для наземних екосистем з популяцією сосни звичайної, хребетних тварин та 400 мкГр·год<sup>-1</sup> для водних екосистем, груп водних організмів, безхребетних тварин і рослин (ICRP, 2008).

Оцінки радіаційних ризиків опромінення виконано для наземної екосистеми з дерев'янистою рослинністю на території хвостосховища «Центральний яр» для ділянок із різним рівнем поверхневого забруднення, залишками уранового виробництва і рівнями ПАЕД гамма-випромінювання.



Розрахунки показали, що дози опромінення (ДО) для референтних груп біоти наземних екосистем, а саме: для рослинних угруповань (трави, лишайники і мохоподібні, кущі, дерева), безхребетних тварин (кільчасті черви, детритоїдні членистоногі, брюхоногі молюски, крилаті комахи), хребетних тварин (рептилії, птахи, ссавці маленьких розмірів) – у сучасних умовах забруднення майданчика є безпечними, а також не будуть перевищувати рівні безпеки опромінення навіть за умов 10-разового перевищення сучасного рівня активності радіонуклідів уранового ряду в ґрунтах майданчика на більшій частині його території. Встановлено, що у гіпотетичних умовах проживання тварин на окремих локальних ділянках території із високим вмістом залишків уранового виробництва в ґрунтах, де вміст  $^{226}\text{Ra}$  може перевищувати фонові рівні забруднення майданчика в 15 і більше разів, є потенційна загроза високих ризиків опромінення для групи рептилій. Коефіцієнт ризику ( $\text{КР}=\text{ДО}$  організму/ $\text{РДО}$ ) може перевищувати в 1,4 раза критичний рівень. Серед рослинних угруповань найбільші ризики оцінено для груп лишайників і мохоподібних, коефіцієнт ризику для яких буде в 1,6–4,8 раза перевищувати референтний рівень за умов 50-разового перевищення фонового рівня  $^{226}\text{Ra}$  в ґрунті. Дерев'яниста рослинність має найнижчий коефіцієнт ризику (0,03–0,08) в сучасних умовах забруднення майданчика залишками уранового виробництва.

Результати дослідження накопичення радіонуклідів уранового ряду в дерев'янистій рослинності як основного ценозоутворюючого угруповання наземної екосистеми майданчика показали, що кореневий шлях винесення радіонуклідів на поверхню із хвостосховищ з опадом листя є незначним. Коефіцієнти накопичення (на масу сухої речовини) для  $^{238}\text{U}$  варіюють від  $10^{-4}$  до  $10^{-2}$ , для  $^{226}\text{Ra}$ ,  $^{210}\text{Pb}$  – від  $10^{-4}$  до  $10^{-1}$ . Більш рухомі радіонукліди  $^{226}\text{Ra}$  і  $^{210}\text{Pb}$  на порядок перевищують накопичення  $^{238}\text{U}$ , але питома активність цих радіонуклідів у сирій деревині не перевищує  $1 \text{ кБк}\cdot\text{кг}^{-1}$ , навіть на забруднених ділянках. Тому в разі санітарних рубок деревини на поверхні хвостосховищ поводження з деревиною може буде звільнено від регуляторного контролю. Але в разі спалювання деревини з найбільш забруднених ділянок території із високим вмістом  $^{226}\text{Ra}$  ( $>5 \text{ кБк}\cdot\text{кг}^{-1}$ ) у золі деревини активність  $^{226}\text{Ra}$  може перевищувати рівень звільнення  $1 \text{ кБк}\cdot\text{кг}^{-1}$ .

Показано, що впливи забруднених вод і донних відкладів р. Коноплянка на опромінення водної біоти є суттєво вищими, ніж на фонових ділянках досліджень водної екосистеми дніпровських водосховищ для всіх обраних таксономічних груп водних організмів. На сьогодні потужність поглинутої дози опромінення гідробіонтів р. Коноплянка не перевищує референтний рівень  $400 \text{ мкГр}\cdot\text{год}^{-1}$  (коефіцієнти радіоекологічних ризиків  $\text{КР}$  становлять 0,01–0,03). Встановлено, що найбільш вразливими групами водної екосистеми є зоопланктон, личинки комах і молюски, потужність поглинутої дози опромінення яких може наближатися до референтних значень (0,57–0,60) (табл. 1).

Оцінка дози опромінення (ДО) гідробіонтів за гіпотетичними сценаріями зростання тільки об'ємної активності  $\text{U}$  у воді (в 5 разів) або  $^{226}\text{Ra}$  (у 2 рази) показали, що за умов можливого підвищення рівнів забруднення р. Коноплянка

радіоекологічні ризики для водних організмів можуть суттєво зрости і досягати референтних рівнів, особливо через зростання активності  $^{226}\text{Ra}$  у воді.

Таблиця 1

**Потужність поглинутої дози опромінення ( $\text{мкГр}\cdot\text{год}^{-1}$ ) біоти  
й очікувані коефіцієнти ризику опромінення у водних екосистемах  
р. Дніпро і р. Коноплянка**

Об'єкти й умови експертної оцінки		Фактичні дані спостережень за період (2005–2017 рр.)				Стрес-тест, гіпотетичного зростання у воді середньої річної активності певного радіонукліду			
		р. Дніпро		р. Коноплянка					
		середні фонові рівні		середні рівні забруднення		$^{238, 234}\text{U}$ у 5 разів до $1,0 \text{ Бк}\cdot\text{дм}^{-3}$		$^{226}\text{Ra}$ у 2 рази до $0,10 \text{ Бк}\cdot\text{дм}^{-3}$	
Референтні групи	РР*	ДО	КР	ДО	КР	ДО	КР	ДО	КР
Фітопланктон	400	1,62	0,004	4,14	0,010	7,79	0,020	5,58	0,014
Зоопланктон	400	27,7	0,069	240	0,600	323	0,808	386	0,965
Ракоподібні	400	4,71	0,012	10	0,025	20,5	0,051	10,8	0,027
Личинки комах	400	100	0,251	240	0,601	324	0,809	386	0,966
Молюски	400	101	0,252	241	0,604	327	0,817	388	0,969
Пелагічні риби	400	2,01	0,005	5,76	0,014	13,0	0,032	8,68	0,022
Донні риби	400	2,01	0,005	5,79	0,015	13,0	0,033	8,70	0,022
Водні рослини	400	2,15	0,005	10,2	0,026	36,6	0,092	12,7	0,041

Примітка. \*Референтний рівень потужності поглинутої дози,  $\text{мкГр}\cdot\text{год}^{-1}$

Проведено оцінку накопичення ізотопів урану (об'ємна активність яких у воді в 10–20 разів вища за інші радіонукліди) у риби р. Коноплянка на прикладі карася сріблястого (*Carassius gibelio* (Bloch, 1972)) як найбільш поширеного виду для цієї водної екосистеми. Результати оцінок показали, що ізотопи U найбільше концентруються в лусці (питому активність урану визначено в діапазоні від 0,2 до 3,0  $\text{Бк}\cdot\text{кг}^{-1}$  сирої ваги), кістках (від 0,09 до 1,3  $\text{Бк}\cdot\text{кг}^{-1}$ ) і менше всього у м'язах (від 0,03 до 0,50  $\text{Бк}\cdot\text{кг}^{-1}$ ). Коефіцієнти накопичення (КН) урану (на масу сирої речовини) визначено для луски в межах 6–10, у кістках 2–5, а м'язах на рівні КН 1–2.

Оцінки показали, що накопичення U в м'язах риби у р. Коноплянка є до 10 разів вищим ( $20 \text{ мкГУ}\cdot\text{кг}^{-1}$ ), ніж на фонових ділянках дослідження в дніпровських водосховищах ( $1 \text{ мкГУ}\cdot\text{кг}^{-1}$ ). За гіпотетичним сценарієм споживання риби із р. Коноплянка, показано, що за умов добового споживання риби у кількості до 1,0 кг на добу (консервативні оцінки) ризики опромінення є нижче рекомендованих рівнів ВООЗ ( $0,6 \text{ мкГУ}\cdot\text{кг}^{-1}$  тіла для добового споживання).

**Оцінки доз опромінення персоналу на майданчику ВО «ПХЗ».** Комплексний аналіз характеристик радіоактивного забруднення елементів природного середовища та робочих місць дозволили провести об'єктивний аналіз формування доз опромінення працівників на різних об'єктах і ділянках майданчика. Попередніми результатами дослідження встановлено, що основним

об'єктом найбільш уразливим для опромінення є персонал, який працює на майданчику. За результатами узагальнення даних основних чинників, які формують сумарні дози опромінення, за умови перебування на виділених ділянках або у цехах будівель колишнього уранового виробництва протягом одного часу, зроблені оцінки величини та структури очікуваної ефективних доз (ЕД) опромінення (табл. 2).

Таблиця 2

**Оцінки величини та структури доз опромінення персоналу, який працює в будівлях на території майданчика ВО «ПХЗ»**

Місце перебування	Потужність ЕД опромінення, мкЗв·год <sup>-1</sup>			Внесок у загальну дозу, %		
	Зовнішнє опромінення	Внутрішнє опромінення		Сумарна потужність ЕД	Зовнішнє опромінення	Внутрішнє опромінення від <sup>222</sup> Rn та ДПР
		<sup>222</sup> Rn та ДПР	інших аерозолів			
цех № 103, 3 поверх	100	9,0	0,1	109	91,7	8
цех № 103, 1 поверх	20,9	9,3	0,10	30,3	69,0	30,6
цех № 6, підвал	0,5	31,1	0,01	31,6	1,7	98,3
цех № 8, підвал	2,0	3,1	0,01	5,1	39,5	60,4
Локальні гарячі точки	15,0	3,1	0,19	18,4	81,1	16,6
Зовні будівлі № 103	5,9	1,2	0,02	7,2	82,9	16,5
«Південно-східне»	2,9	1,8	0,28	5,1	57,9	35,4
«Центральний Яр»	2,1	1,8	0,01	3,9	53,8	46,1
«Західне»	0,8	1,2	-	2,0	41,1	58,7

Встановлено, що залежно від місця перебування основними чинниками (до 50 % і більше внеску в сумарну ефективну дозу) опромінення робітників на території майданчика є зовнішнє гамма-опромінення і внутрішнє, обумовлене інгаляцією <sup>222</sup>Rn і його дочірніми продуктами розпаду (ДПР). Доля аерозольного забруднення збільшується до 5 % тільки в умовах значної запиленості території (наприклад, під час ведення земляних робіт у теплі сухі періоди року). Найбільш небезпечним для персоналу є перебування в деяких будівлях спадщини уранового виробництва, де зосереджені концентрати переробки уранових руд.

Гіпотетичне тривале перебування людей на забруднених ділянках території, на поверхні хвостосховищ і в інших місцях концентрованого накопичення радіоактивних залишків уранового виробництва може бути небезпечним для персоналу. Встановлено, що в окремих приміщеннях залежно від специфіки їх застосування доля зовнішнього опромінення або радону може збільшуватися до 98 %. Отримані оцінки прогнозних річних ефективних доз опромінення різних категорій працівників, різних сценаріїв опромінення і часу перебування на об'єкті доводять, що в сучасних умовах річні ефективні дози опромінення робітників категорії А і Б, що працюють на території «ПХЗ» у будівлях, які не використовувалися для уранового виробництва, а також дози опромінення населення за межами майданчика «ПХЗ» не перевищують

встановлених НРБУ-97 лімітів річної ефективної дози (20 мЗв, 2 мЗв і 1 мЗв відповідно).

Оцінки максимальних доз опромінення робітників, що будуть брати участь у роботах з ремедіації (у майбутньому) перевищують ліміт річної ефективної дози (20 мЗв), встановлений НРБУ-97. Найбільші дози можуть отримувати робітники, які будуть залучені до демонтажу і дезактивації будівель колишніх цехів екстракційного виробництва урану і торієвої очистки. Для деяких із них можливі висока потужність дози зовнішнього гамма-опромінення (ПАЕД до  $1 \text{ мЗв} \cdot \text{год}^{-1}$ ), особливо в місцях біля ємкостей, де накопичено сухі залишки комплексних радіохімічних розчинів уранових руд. У таких будівлях виявлено значну кількість дрібнодисперсних часток залишків уранових концентратів та інших матеріалів. Тому всі роботи в таких будівлях потребують запровадження заходів радіаційного контролю і попередньої дезактивації. Відповідно, в період демонтажу обладнання і будівельних конструкцій мають бути запроваджені програми індивідуального моніторингу опромінення в приміщеннях ведення робіт і спеціальні програми моніторингу довкілля з метою контролю безпеки поводження з відходами очищення ділянок розташування таких об'єктів.

Основним контингентом потенційного опромінення зараз, у період приведення майданчика у безпечний стан, залишаються тільки працівники підприємств, що розташовані у межах майданчика.

Отже, встановлено, що при проведенні ремедіаційних заходів, дані щодо рівнів забруднення ґрунтів, повітря та поверхневих і підземних вод є базою для визначення режиму перебування робітників на радіаційно-небезпечних об'єктах. Встановлено, що в кожному конкретному випадку категорія працівників (віднесення до персоналу) визначається конкретною ділянкою та умовами роботи. Відповідно для всіх етапів здійснення ремедіаційних заходів необхідно зберігати особливий режим регуляторного нагляду, виконувати заходи радіаційного контролю і продовжувати моніторинг забруднення довкілля зони його впливу.

**Рекомендації щодо програми моніторингу природного середовища на об'єктах уранової спадщини.** На підставі виявлених трендів і закономірностей формування рівнів забруднення навколишнього середовища та біологічних об'єктів у зоні потенційного впливу об'єктів радіаційної спадщини колишнього ВО «ПХЗ» розроблено рекомендації щодо організації і виконання програм радіоекологічного моніторингу, які також можуть бути запроваджені на інших об'єктах спадщини уранових виробництв. Відзначено, що програми моніторингу таких майданчиків можуть суттєво змінюватися відповідно до завдань, які вирішуються на різних етапах приведення таких майданчиків у безпечний стан.

На етапі планування реабілітаційних заходів спостереження мають за мету ідентифікацію джерел забруднення довкілля і визначення ролі основних шляхів формування опромінення (зовнішнє опромінення, інгаляція або споживання води і продуктів харчування). На етапі розробки програм і регламентів спостережень формується концептуальна модель майданчика, яка дає змогу зрозуміти функцію всіх основних джерел і шляхів формування радіаційних

і екологічних впливів, визначається необхідність та масштаби інженерних і організаційних заходів приведення таких майданчиків у безпечний стан.

На етапі здійснення інженерних заходів (очищення території, демонтажу забруднених будівель, будівництва покриття хвостосховищ тощо) або в період введення адміністративних обмежень доступу до забруднених об'єктів у регламенти моніторингу додаються функції радіаційного контролю безпеки опромінення персоналу, визначення можливих ефектів забруднення в процесі транспортування або поводження із забрудненими матеріалами і недопущення таких впливів.

Особливість завдань програми моніторингу після завершення ремедіаційних заходів полягає у необхідності довести, що за показниками забруднення, очікуваними дозами опромінення і екологічними впливами на довкілля, результати заходів відповідають встановленим критеріям радіаційної і екологічної безпеки.

Результати моніторингу стану забруднення довкілля після завершення заходів є підставою для повного або часткового звільнення очищеного майданчика від регуляторного контролю. У разі часткового звільнення діяльності на таких майданчиках від регуляторного контролю, програми моніторингу і технічного нагляду стають інструментами інституціонального контролю.

Важливим елементом програм є необхідність виконання регулярних спостережень і досліджень накопичення радіонуклідів U-ряду в біоті, окремі представники якої можуть бути індикаторами довготривалого накопичення радіонуклідів уранового ряду в екосистемі, а тому потребують довготривалих спостережень як елемент радіаційного контролю. Особливістю програм моніторингу є необхідність визначення ризиків нерадіологічної природи, зокрема, від забруднення довкілля супутніми хімічними речовинами.

Одним із важливих елементів моніторингових програм має бути впроваджена система аналізу, обробки і збереження даних довготривалих спостережень.

Ефективні результати програм радіоекологічного моніторингу для управління радіаційною і екологічною безпекою довкілля на майданчиках спадщини уранових виробництв можна досягти лише за умови комплексних спостережень за динамікою впливу джерел і основних шляхів опромінення людей, біоти, які дають змогу визначити ефективність впровадження ремедіаційних заходів і здійснювати контроль стану майданчиків радіологічної спадщини протягом довготривалого періоду.

## **ВИСНОВКИ**

У дисертації вперше наведено теоретичні узагальнення і практичне розв'язання наукового завдання щодо визначення впливу радіоактивних залишків переробки уранових руд на майданчику колишнього ВО «ПХЗ» на забруднення довкілля, біоти й опромінення персоналу та населення в контексті обґрунтування стратегій приведення цього об'єкта в безпечний стан.

1. Вперше досліджено динаміку і тренди формування забруднення ґрунтів, повітря, поверхневих і підземних вод, встановлено:

- площі території з рівнями зовнішнього гамма-опромінення від  $0,5 \text{ мкЗв}\cdot\text{год}^{-1}$  до  $30 \text{ мкЗв}\cdot\text{год}^{-1}$  складають до 30 % і потребують очищення. У структурі забруднення ґрунтів залежно від місця розташування певних технологічних циклів колишнього уранового виробництва домінують різні радіонукліди U-ряду із максимальними рівнями забруднення поверхневого шару ґрунту для  $^{230}\text{Th}$  до  $3 \text{ МБк}\cdot\text{кг}^{-1}$ ,  $^{226}\text{Ra}$  – до  $9 \text{ МБк}\cdot\text{кг}^{-1}$  і  $^{238}\text{U}$  – до  $3,2 \text{ МБк}\cdot\text{кг}^{-1}$ ;

- об'ємні активності  $^{238}\text{U}$  і  $^{226}\text{Ra}$  в повітрі та щільність їх випадінь можуть перевищувати фонові ( $4,0 \text{ мкБк}\cdot\text{м}^{-3}$  і  $0,05 \text{ мкБк}\cdot\text{м}^{-2}\cdot\text{с}^{-1}$  відповідно) до 100 разів (особливо в посушливі сезони років під час проведення земляних робіт), але такі впливи є локальними (до 500 м від джерела пилу);

- варіації рівнів ексхаляції  $^{222}\text{Rn}$  (від 1,5 до  $100 \text{ Бк}\cdot\text{м}^{-2}\cdot\text{с}^{-1}$ ) на поверхні ґрунтового покриття хвостосховищ свідчать про його невідповідність проєктним умовам безпеки ( $1 \text{ Бк}\cdot\text{м}^{-2}\cdot\text{с}^{-1}$ ) і потребу у відновленні;

- усереднені значення ОА  $^{222}\text{Rn}$  на майданчику варіюють у широкому діапазоні значень (від 0,2 до  $10 \text{ кБк}\cdot\text{м}^{-3}$  на відкритому повітрі залежно від метеорологічних умов) і від 0,2 до  $3 \text{ кБк}\cdot\text{м}^{-3}$  у будівлях (максимальні  $20 \text{ кБк}\cdot\text{м}^{-3}$  визначено в підвальних приміщеннях), що обумовлює потужність очікуваної ефективної дози внутрішнього опромінення персоналу від 0,06 до  $31 \text{ мкЗв}\cdot\text{год}^{-1}$  та від 1,3 до  $28,8 \text{ мкЗв}\cdot\text{год}^{-1}$  відповідно.

2. Основними факторами опромінення залежно від місця перебування персоналу (від 50 до 90 % загальної дози) є: зовнішнє гамма-опромінення, інгаляційне опромінення через надходження  $^{222}\text{Rn}$  і його ДПР; опромінення внаслідок інгаляційного надходження забруднених часток пилу є значущим (до 5 % від загальної дози) тільки для робітників в умовах високого запилення.

3. Впливи атмосферних шляхів за рахунок перенесення  $^{222}\text{Rn}$  і аерозольних часток з території майданчика на опромінення населення міста не виявлено (річні ефективні дози опромінення визначено в межах 0,02–0,05 мЗв).

4. Встановлено, що винесення радіонуклідів U-ряду за межі майданчика ВО «ПХЗ» потенційно може відбуватися тільки з поверхневими і підземними водами. Визначено, що основний вплив на радіоактивне забруднення підземних вод мають процеси надходження ізотопів U із уранових хвостосховищ на території майданчика. За час їхнього існування (більше 70 років) підземні води із дуже високими концентраціями ( $^{238+234}\text{U}$   $10\text{--}1000 \text{ Бк}\cdot\text{дм}^{-3}$  під тілом хвостосховища) перемістилися на відстань до 300 м за напрямком їхнього руху. Ореол плями високозабруднених ураном вод може досягти зони їх розвантаження у р. Коноплянка через 100–300 років (за результатами моделювання). Це доводить, що протягом наступних кількох сотень років діяльність на майданчику не може бути повністю звільнена від регуляторного контролю, а спостереження необхідно продовжувати.

5. Доведено, що внесок поверхневого стоку урану з водозборів майданчика не створює ризику радіаційного забруднення вод Дніпровського водосховища. Показано, що з водами р. Коноплянка у водосховище надходить 9–12 ГБк  $^{238+234}\text{U}$ ,

що складає близько 1 % від величини стоку  $U$  (за рахунок інших природних джерел надходження) з водами р. Дніпро.

6. Встановлено, що рівні накопичення  $U$  в м'язах риб (*Carassius gibelio*) з р. Коноплянка у 10 разів вищі, ніж на фонових ділянках Дніпровського водосховища, дози опромінення гідробіонтів р. Коноплянка є вищими за фонові від 2 до 10 разів, формуються переважно за рахунок  $^{226}\text{Ra}$  у воді і донних відкладах. Дози опромінення зоопланктону і бентосу не перевищують референтний рівень  $-400 \text{ мкГр}\cdot\text{год}^{-1}$ .

7. Визначено потужність поглиненої дози опромінення біоти в наземних штучних екосистемах на ділянках території майданчика із високим вмістом залишків переробки уранових руд (де вміст  $^{226}\text{Ra}$  у ґрунтах  $\geq 1,5 \text{ кБк}\cdot\text{кг}^{-1}$ ), що перевищує референтний рівень  $400 \text{ мкГр}\cdot\text{год}^{-1}$  для групи лишайників і мохоподібних, а також  $40 \text{ мкГр}\cdot\text{год}^{-1}$  для групи рептилій. Накопичення  $U$  в наземній біомасі багаторічних дерев є низьким (КН варіює від  $10^{-4}$  до  $10^{-2}$ ), переважно накопичує  $^{226}\text{Ra}$  і  $^{210}\text{Pb}$  (КН від  $10^{-4}$  до  $10^{-1}$ ). У разі спалювання деревини після санітарних рубок активність  $^{226}\text{Ra}$  в золі може перевищувати рівень звільнення  $1 \text{ кБк}\cdot\text{кг}^{-1}$ , тому поводження із деревиною потребує радіаційного контролю.

8. Встановлено, що об'єкти спадщини уранового виробництва ВО «ПХЗ» можуть формувати значні дози опромінення в робітників підприємств, розміщених на майданчику. У сучасних умовах річні ефективні дози опромінення робітників цих підприємств не перевищують встановлені рівні безпеки (НРБУ-97) і складають 0,1–0,4 мЗв. Найгірші сценарії опромінення, за яких оцінки максимальних річних ефективних доз опромінення перевищують 20 мЗв можуть бути реалізовані тільки для персоналу, що буде виконувати ремедіаційні заходи.

9. На основі результатів досліджень розроблено наукові основи комплексної програми радіоекологічного моніторингу майданчиків радіологічної спадщини із застосуванням сучасних методів оцінки стану і впливів таких майданчиків на довкілля і опромінення, а також сучасних уявлень про причинно-наслідкові зв'язки довготривалого утримання великих об'ємів радіоактивних залишків і відходів переробки уранових руд як інструмента інформаційної підтримки розробки стратегій і приведення таких майданчиків у безпечний стан.

## ПРАКТИЧНІ РЕКОМЕНДАЦІЇ

1. Відновити виконання комплексних програм радіоекологічного моніторингу на території і в зонах впливу колишнього уранового виробництва ВО «ПХЗ» із урахуванням розроблених методичних підходів.

2. Пріоритетним напрямом регулярних спостережень мають стати програми моніторингу, спрямовані на дотримання безпеки працівників підприємств, що розташовані на майданчику, та персонал, який здійснює заходи приведення його у безпечний стан.

3. Фонові спостереження на всіх етапах здійснення ремедіаційних заходів мають включати моніторинг атмосферного повітря на майданчику і в найближчих зонах проживання населення.

4. Спостереження за забрудненням підземних вод мають виконуватися протягом тривалого часу після завершення заходів приведення майданчика у безпечний стан; мережу пунктів спостережень має бути відновлено і розширено.

5. Природні екосистеми зони радіологічного впливу ВО «ПХЗ» є унікальними полігонами радіоекологічних досліджень, які необхідно продовжувати.

## СПИСОК ОСНОВНИХ ПУБЛІКАЦІЙ ЗА ТЕМОЮ ДИСЕРТАЦІЇ

Статті у наукових виданнях,  
включених до категорії «А» Переліку наукових фахових видань України,  
та/або наукових періодичних виданнях,  
проіндексованих у базах даних Web of Science Core Collection та/або Scopus

1. Bugai D., Laptev G., Skalskyu O., **Lavrova T.**, Avila R. Analysis of spatial distribution and inventory of radioactivity within the uranium mill tailings impoundment. Ядерна фізика та енергетика. 2015. № 3. С. 254–262. *(Здобувачкою здійснено спектрометричний аналіз проб, первинне опрацювання матеріалів).*

2. Korychenskyi K. O., Laptev G. V., Voitsekhovych O. V., **Lavrova T. V.**, Dyvak T. I. Speciation and mobility of uranium in tailings materials at the u-production legacy site in Ukraine. Ядерна фізика та енергетика. 2018. № 3. С. 270–279. *(Здобувачкою здійснено спектрометричний аналіз проб, первинне опрацювання матеріалів).*

3. Voitsekhovitch O., Soroka Y., **Lavrova T.** Uranium mining and ore processing in Ukraine – radioecological effects on the Dnipro River water ecosystem and human health. Radioactivity in the Environment. 2006. Vol. 8. P. 206–214. *(Здобувачкою здійснено збір матеріалу, радіохімічний, спектрометричний аналіз, узагальнення результатів, підготовку тексту публікації).*

4. Voitsekhovych O., **Lavrova T.** Chapter 7. Remediation Planning of Uranium Mining and Milling Facilities: The Pridneprovsky Chemical Plant Complex in Ukraine. Radioactivity in the Environment. 2009. Vol. 14. P. 343–356. *(Здобувачкою здійснено узагальнення результатів, підготовку частини тексту публікації).*

5. Voitsekhovych O., **Lavrova T.** Optimizing monitoring of a legacy uranium processing site. Nuclear Engineering International. 2012. Vol. 657. P. 20–24. *(Здобувачкою здійснено узагальнення результатів, підготовку частини тексту публікації).*

6. **Lavrova T.**, Voitsekhovych O. Radioecological assessment and remediation planning at the former uranium milling facilities at the Pridnieprovsky Chemical Plant in Ukraine. Journal of Environmental Radioactivity. 2013. Vol. 115. P. 118–123. *(Здобувачкою здійснено збір матеріалу, радіохімічний, спектрометричний аналіз, узагальнення результатів, підготовку частини тексту публікації).*



7. Kovalets I., Asker Ch., Kchalchenkov A., Persson Ch., **Lavrova T.** Atmospheric dispersion of radon around uranium mill tailings of the former Pridneprovsky Chemical Plant in Ukraine. *Journal of Environmental Radioactivity*. 2017. Vol. 172. P. 173–190. *(Здобувачкою здійснено збір матеріалу, узагальнення результатів, первинне опрацювання матеріалів)*.

#### **Статті в інших наукових виданнях**

8. **Лаврова Т. В.**, Дворецкий А. И. Накопление урана в абиотических и биотических компонентах Днепровского водохранилища. *Наукові праці Українського науково-дослідного гідрометеорологічного інституту*. 2003. Вип. 252. С. 115–122. *(Здобувачкою здійснено збір матеріалу, радіохімічний аналіз, узагальнення результатів, підготовку тексту публікації)*.

9. **Лаврова Т. В.**, Кориченський К. О., Войцехович О. В. Забруднення ґрунтів і атмосферного повітря на територіях впливу колишнього уранового виробництва ВО «Придніпровський хімічний завод». *Вісник Одеського національного університету. Серія: Географічні та геологічні науки*. 2021. Т. 26. Вип. 2 (39). С. 64–77. *(Здобувачкою здійснено спектрометричний аналіз, узагальнення результатів, підготовку частини тексту публікації)*.

10. Кориченський К. О., **Лаврова Т. В.**, Войцехович О. В. Екологічні і економічні аспекти безпечного утримання фосфогіпсу на майданчику колишнього уранового виробництва «Придніпровський хімічний завод». *Людина та довкілля. Проблеми неоекології*. 2021. № 36. С. 96–110. *(Здобувачкою здійснено спектрометричний аналіз, аналіз результатів, підготовку частини тексту публікації)*.

11. Ткаченко К. Ю., Скальський О. С., Бугай Д. О., **Лаврова Т. В.**, Процак В. П., Кубко Ю. І. Моніторинг техногенного забруднення підземних і поверхневих вод в зоні впливу уранових хвостосховищ Придніпровського хімічного заводу (м. Кам'янське). *Геологічний журнал*. 2020. Вип. 372 (3). С. 17–35. *(Здобувачкою здійснено радіохімічний аналіз проб та первинне опрацювання матеріалів)*.

12. Бугай Д. О., Заноз Б. Ю., **Лаврова Т. В.**, Кориченський К. О., Кубко Ю. І., Авіла Р., Рець Ю. М. Розвиток системи моніторингу підземних вод у зоні впливу об'єктів спадщини уранового виробництва Придніпровського хімічного заводу. *Геологічний журнал*. 2021. № 4. С. 56–70. *(Здобувачкою здійснено радіохімічний аналіз проб та первинне опрацювання матеріалів)*.

13. Ковалец И., Железняк М., Халченков А., Удовенко О., **Лаврова Т.** Численное моделирование воздушного распространения радона вокруг урановых хвостохранилищ. *Электрон. моделирование*. 2010. № 3. С. 67–81. *(Здобувачкою здійснено збір, аналіз та первинне опрацювання матеріалів)*.

14. Халченков А. В., Ковалец И. В., **Лаврова Т. В.**, Тодосиенко С. В. Моделирование атмосферного переноса радионуклидов в составе частиц пыли в окрестностях объектов хранения радиоактивных отходов. *Проблеми безпеки атомних електростанцій і Чорнобиля*. 2016. Вип. 27. С. 19–29. *(Здобувачкою здійснено збір, аналіз та первинне опрацювання матеріалів)*.

15. **Лаврова Т. В.**, Кориченський К. О., Войцехович О. В. Оцінка багаторічних просторово-часових змін хімічного складу підземних вод у зоні впливу колишнього уран-переробного підприємства ВО «Придніпровський хімічний завод». Гідрологія, гідрохімія і гідроекологія. 2022. № 4. С. 81–95. *(Здобувачкою здійснено збір, радіохімічний і спектрометричний аналіз, статистичну обробку, аналіз результатів, підготовку частини тексту публікації).*

#### Методичні вказівки

16. Сердюк А. М., Лось І. П., Аксенов М. В., Бузинний М. Г., Маленко М. Д., Молчанов О. І., Наговіцина Л. І., Павленко Т. О., Подрезов О. А., Семенюк Н. Д., Сорока Ю. М., Сорока М. М., Фризюк М. А., Цимбалюк О. М., Шабуніна Н. Д., Войцехович О. В., **Лаврова Т. В.**, Скальський О. С. Методичні вказівки щодо радіаційно-гігієнічного регламентування проведення робіт на об'єктах ліквідованого Придніпровського хімічного заводу (ПХЗ): методичні вказівки. Київ, 2007. 31 с. *(Затверджено Наказом МОЗ України від 11.01.2007 р. № 3. Здобувачкою здійснено підготовку частини тексту публікації).*

#### Матеріали та тези наукових доповідей

17. Voitsekhovitch O., Soroka Y., **Lavrova T.** Uranium mining and ore processing in Ukraine and its radioecological effects on the Dnieper River water ecosystem and human health. International Conference on Isotopes in Environmental Studies. Monte-Carlo, Monaco, 25–29 October 2004: book of abstracts. Monte-Carlo, 2004. P. 58–59. *(Здобувачкою здійснено збір, аналіз та первинне опрацювання матеріалів).*

18. Buzynnyy M., **Lavrova T.**, Romanenko M., Sakhno V. Radon in Soil Gas Versus Radon Flow in Characterization of Uranium Tailing Sites. 6<sup>th</sup> Conference on Protection Against Radon at Home and at Work, Praha, 13–17 September 2010: book of abstracts. Praha, 2010. P. 70. *(Здобувачкою отримано частину експериментального матеріалу, на основі якого підготовано тези).*

19. Voitsekhovych O., **Lavrova T.**, Kostezh A. Optimisation (Sampling Strategies and Analytical Procedures) for Site Specific Environment Monitoring at the Areas of Uranium Production Legacy Sites in Ukraine. ASME 2011: 14<sup>th</sup> International Conference on Environmental Remediation and Radioactive Waste Management, Reims, France, September 25–29, 2011: book of abstracts. Reims, 2011. P. 395–402. *(Здобувачкою здійснено збір, аналіз та первинне опрацювання матеріалів).*

20. **Лаврова Т. В.**, Войцехович О. В., Канівець В. В., Деркач Г. А. Оцінка виносу природних радіонуклідів із зони впливу колишнього підприємства з переробки уранової сировини, їх переносу та розподілі в екосистемі Дніпровського водосховища. XXII щорічна наукова конференція Інституту ядерних досліджень НАН України, м. Київ, 26–30 січня 2015 року: тези доповіді. Київ, 2015. С. 206–207. *(Здобувачкою здійснено збір, радіохімічний і спектрометричний аналіз, статистичну обробку, аналіз результатів, підготовку частини тексту публікації).*

21. **Лаврова Т. В.**, Войцехович О. В., Канівець В. В., Тодосієнко С. В. Результати дослідження радіоактивного та хімічного забруднення седиментаційного відстійника на р. Коноплянка у зоні впливу колишнього підприємства з переробки уранової руди. XXII щорічна наукова конференція Інституту ядерних досліджень НАН України, м. Київ, 26–30 січня 2015 року: тези доповіді. Київ, 2015. С. 207–208. *(Здобувачкою здійснено збір, радіохімічний і спектрометричний аналіз, статистичну обробку, аналіз результатів, підготовку частини тексту публікації).*

22. Kchalchenkov A., Kovalets I., Asker S., **Lavrova T.**, Todosienko S., Avila R. Application of the complex of atmospheric transport models for assessment of impact on the environment of the territories of former uranium production. Проблеми виведення з експлуатації об'єктів ядерної енергетики та відновлення оточуючого середовища: I Міжнародна конференція. Славутич, 2016. С. 56–64. *(Здобувачкою здійснено збір, аналіз та первинне опрацювання матеріалів).*

23. **Лаврова Т. В.**, Лаптев Г. В., Войцехович О. В., Канівець В. В., Деркач Г. А., Соколов С. Б. Оцінка процесу осадко накопичення у Дніпровському водосховищі за даними радіометричного датування. XXIII щорічна наукова конференція Інституту ядерних досліджень НАН України, м. Київ, 01–05 лютого 2016 року: тези доповіді. Київ, 2016. С. 222. *(Здобувачкою здійснено збір, радіохімічний і спектрометричний аналіз, статистичну обробку, аналіз результатів, підготовку частини тексту публікації).*

24. **Лаврова Т. В.**, Войцехович О. В., Тодосієнко С. В., Деркач Г. А., Кориченський К. О. Моніторинг як інструмент оцінки впливу на навколишнє природне середовище спадщини підприємства з переробки уранової сировини ВО «ПХЗ». XXIV щорічна наукова конференція Інституту ядерних досліджень НАН України, м. Київ, 10–13 квітня 2017 року: тези доповіді. Київ, 2017. С. 235. *(Здобувачкою здійснено узагальнення матеріалу, підготовку частини тексту публікації).*

25. **Лаврова Т. В.**, Лаптев Г. В., Войцехович О. В., Тодосієнко С. В., Деркач Г. А., Соколов С. Б. Оцінка вертикальної структури забруднення ґрунтів на території колишнього підприємства з переробки уранової сировини ВО «ПХЗ». XXIV щорічна наукова конференція Інституту ядерних досліджень НАН України, м. Київ, 10–13 квітня 2017 року: тези доповіді. Київ, 2017. С. 236–238. *(Здобувачкою здійснено спектрометричний аналіз проб, статистичну обробку, аналіз результатів, підготовку частини тексту публікації).*

26. **Лаврова Т. В.**, Шумов С. Н. Статистическая оценка изменений гидрохимического состава и радиоактивного загрязнения поверхностных вод в районе влияния бывшего уранового производства. Проблеми гідрології, гідрохімії, гідроекології: VII Всеукраїнська наукова конференція. Київ, 2018. С. 190–192. *(Здобувачкою здійснено збір, статистичний аналіз, підготовку тексту публікації).*

27. **Лаврова Т. В.**, Ковальчук Л. А., Войцехович О. В. Визначення природних та антропогенних складових формування радіоактивного забруднення поверхневих вод в районі впливу спадщини уранового

виробництва. XXVI щорічна наукова конференція Інституту ядерних досліджень НАН України, м. Київ, 8–12 квітня 2019 року: тези доповіді. Київ, 2019. С. 178–179. *(Здобувачкою здійснено збір, статистичний аналіз, підготовку частини тексту публікації).*

28. **Лаврова Т. В.**, Войцехович О. В., Соколов С. Б., Кашпур В. О., Ткач А. В. Оцінка радіаційного забруднення аерозолів повітря на території колишнього підприємства з переробки уранових руд. XXVII щорічна наукова конференція Інституту ядерних досліджень НАН України, до 50-річчя Інституту ядерних досліджень НАН України, м. Київ, 21–25 вересня 2020 року: тези доповіді. Київ, 2020. С. 306–307. *(Здобувачкою виконано спектрометричний аналіз всіх аерозольних проб, узагальнення багаторічних даних спостережень, статистичний аналіз, підготовлено текст публікації).*

## АНОТАЦІЯ

**Лаврова Т. В. Радіоекологічний моніторинг майданчиків спадщини уранового виробництва.** Кваліфікаційна наукова праця на правах рукопису.

Дисертація на здобуття наукового ступеня кандидата біологічних наук за спеціальністю 03.00.01 «Радіобіологія». Національний університет біоресурсів і природокористування України. Київ, 2023.

Дослідження присвячено комплексному вивченню проблеми забруднення природного середовища на територіях впливу об'єктів колишнього уранового виробництва «Придніпровський хімічний завод» (ВО «ПХЗ») у м. Кам'янське і виконано як узагальнення результатів багаторічних спостережень (2005–2021 рр.) радіоекологічного стану довкілля зони впливу майданчика ВО «ПХЗ» з метою обґрунтування пріоритетів програми моніторингу довкілля на різних етапах розроблення стратегії приведення цього майданчика у безпечний стан. У роботі виконано детальний аналіз формування забруднення природного середовища радіонуклідами уранового ряду, зокрема  $^{238}\text{U}$ ,  $^{226}\text{Ra}$ ,  $^{230}\text{Th}$ ,  $^{210}\text{Pb}$ ,  $^{210}\text{Po}$  і радоном, а також супутніми хімічними забруднювачами під впливом природних факторів і антропогенної діяльності. Адаптовано й удосконалено методики визначення радіонуклідів урано-торієвих рядів у пробах природного середовища і залишках переробки рудних матеріалів. За результатами моніторингових спостережень визначено дози опромінення персоналу, який має здійснювати заходи приведення майданчика у безпечний стан, а також для населення, що проживає на прилеглих територіях міста.

Виконано оцінки радіоекологічних впливів радіонуклідів уранового ряду в техногенно підвищених концентраціях на формування радіоекологічних ризиків для біологічних об'єктів наземних і водних екосистем. Розроблено рекомендації щодо організації і здійснення моніторингу довкілля для різних етапів приведення територій зони впливу уранової спадщини в безпечний стан. Робота складається із п'яти основних розділів і відображає результати комплексних багаторічних досліджень автора.

**Ключові слова:** радіонукліди урано-торієвих рядів, об'єкти спадщини уранового виробництва, ВО «Придніпровський хімічний завод», радіоекологічний моніторинг, аналітичні методи вимірювань, екологічна безпека, радіаційні ризики, дози опромінення, персонал, населення, біота, методичні рекомендації.

## ANNOTATION

### **Lavrova T. V. Radioecological monitoring at the Uranium legacy sites.**

Qualifying scientific work on the rights of the manuscript

Thesis for the degree of Candidate of Biological Sciences in specialty 03.00.01 «Radiobiology». National University of Life and Environmental Sciences of Ukraine. Kyiv, 2023.

This study is dedicated to the comprehensive radio-ecological assessment at the former uranium production facilities «Prydniprovsky Chemical Plant» (hereinafter «PCP») and carried out using the long-term site-characterization and radioecological monitoring data (2005–2021) in order to substantiate the priorities in monitoring programs to support of the remediation strategies of bringing this site to a safe state.

After the termination of production activities of «PCP» in 1992, the decommissioning measures at the Uranium-concentrate production facilities and remediation of this site to bring this site into ecologically safe state have not been complete until now. Contaminated areas of the "PCP" U-legacy site, high contaminated buildings of the former U-production infrastructure and the U-tailings, where millions of tons of radioactive residues accumulated and remained from the past, have become significant sources of radiation exposure for the personnel and the public, and continues to contaminate the surrounding environment.

The bring this site to a safe state requires a comprehensive site-specific characterization study, establishing a site-specific radioecological monitoring program and carrying out the exposure pathway analyses and safety assessment studies assessing its role in the formation of radiation and ecological risks at the U-legacy site and at the surrounding environment. This study is devoted to a comprehensive assessment of the environmental contamination at the areas affected by Uranium ore processing industry in past and methodological support in establishing of the site-specific and task-specific environment monitoring system as a necessary element of information support in justification of the environment remediation for the former «PCP». A detailed analysis of environmental contamination at the legacy site by radionuclides of the U-decay series, in particular  $^{238}\text{U}$ ,  $^{226}\text{Ra}$ ,  $^{230}\text{Th}$ ,  $^{210}\text{Pb}$ ,  $^{210}\text{Po}$  and radon, as well as relevant other toxic materials under influence of the natural processes and due to human activities are given.

The results of the observations allow to parameterize mathematical models used for predictive assessments of the distribution of radionuclides of U-decay series in the environment and were used for verification of the remediation projects being partly implemented at the site. The monitoring and modeling data assessing potential impacts

were applicable to assess the radiation exposure doses for personnel on the «PChP» contaminated territory and for the public living in the adjacent territories.

The methods of determination of radionuclides of the uranium-thorium series in the environment samples and in the residues of the processing of ore materials have been adapted and improved for routine monitoring programs at the «PChP» legacy site. Evaluations of the radioecological impacts of radionuclides of the U-decay series in technologically increased concentrations in the formation of radioecological risks for the terrestrial and aquatic ecosystems were carried-out.

The results of this work allow collecting and proceeding a sufficient amount of experimental and observation data for the radio-ecological assessment at the contaminated territories of the U-legacy site. The studies include potential dose exposure assessment for remediation workers and public and finally made it possible to develop recommendations for establishing the site-specific monitoring programs for the different stages of remediation strategy to be implementing at the «PChP» site for bringing it in a safe state. The results of this study allowed the author to form basic principles and methodological principles for optimizing observation regulations in radio-ecological monitoring programs at various stages of implementation of measures.

The work consists of five chapters and reflects the results of the author's research over a long period (2006–2021).

**Key words:** radionuclides of the uranium-thorium series, heritage of uranium production, «Prydniprovskiy Chemical Plant», radio-ecological monitoring, analytical methods for determination of radionuclides of U- decay series in the environment, safety assessment, dose exposure for personnel, public and biota, recommendations and guides for establishing site specific monitoring programs.

Підписано до друку 28.11.23  
Ум. друк. арк. 1,9  
Наклад 100 прим.

Формат 60x84\16  
Зам. № 230697

Віддруковано у редакційно-видавничому відділі НУБіП України  
вул. Героїв Оборони, 15, Київ, 03041  
тел.: 527-81-55