
УПРАВЛІННЯ ВІДХОДАМИ

УДК 621.039.574.5:631.4:633

DOI <https://doi.org/10.32846/2306-9716/2020.eco.5-32.24>

РОЗРАХУНОК ДОЗОВИХ НАВАНТАЖЕНЬ НА МІКРОФЛОРУ ҐРУНТУ, СФОРМОВАНИХ НА ПУНКТАХ ЗБЕРІГАННЯ РАДІОАКТИВНИХ ВІДХОДІВ НА ТЕРИТОРІЇ ЗОНИ ВІДЧУЖЕННЯ ЧАЕС*

Корепанова К.Д.^{1,3}, Шаванова К.Є.², Ілленко В.В.², Рубан Ю.В.²,
Шпирка Н.Ф.², Нестерова Н.Г.², Ніконов С.Б.², Паренюк О.Ю.²

¹ДСП «ЕКОЦЕНТР»

вул. Шкільна, буд. 6, 07270, Чорнобиль, Іванківський р-н, Київська область

²Національний університет біоресурсів і природокористування України
вул. Героїв Оборони, 15, 03041, м. Київ

³Чорнобильський радіаційно-екологічний біосферний заповідник
вул. Полупанова, 2/1, 07270, м. Чорнобиль, Іванківський р-н, Київська область

Olena.parenjuk@gmail.com

Радіаційні умови зони відчуження досить різноманітні і змінюються залежно від відстані до джерела викиду. На особливу увагу, з огляду на радіаційну безпеку території зони відчуження, заслуговують так звані «Пункти тимчасової локалізації радіоактивних відходів», які являють собою місця захоронення різних радіоактивних матеріалів, переважно знятих верхніх шарів ґрунту. Такі захоронення були виконані нашвидкуруч, і поховані матеріали не мають надійної ізоляції від довкілля.

Проаналізовано можливості використання пакета програм ERICA tool для моделювання дозового навантаження на екосистеми ПЗРВ. Визначено доцільність використання названого програмного забезпечення для оптимізації процесу відбору проб у точках ПЗРВ з різними рівнями забруднення. Мета цієї роботи – проаналізувати дозові навантаження на ґрунтові мікробіоми ПЗРВ та визначити наявність таких рівнів опромінення, що можуть мати вплив на зміну структури мікробіому. Методи: в рамках роботи виміряно питому активність зразків ґрунту з ПЗРВ «Буряківка» та ПЗРВ «Підлісний» у 2017 році. За допомогою інструмента комп'ютерного моделювання обраховано дозові навантаження на мікроорганізми. Результати: визначено, що найбільша доза на мікроорганізми в ґрунтах обох ПЗРВ формується на глибині 0–20 см, що свідчить про високі темпи вертикальної міграції радіонуклідів. Найбільший внесок у формування поглинутої дози вносить ¹³⁷Cs. Висновки: програмний продукт ERICA tool дає змогу істотно економити час лабораторних досліджень під час планування експериментів з визначення рівня небезпеки перевищення дозового ліміту для екосистем. Так, спираючись на дані моделювання експозиційної дози на пунктах зберігання радіоактивних відходів, можна будувати гіпотезу щодо можливості структурних змін у мікробіомах локальних ґрунтів, отже, змін у колообігах речовин, викликаних радіонуклідним забрудненням. *Ключові слова:* іонізуюче опромінення, радіонуклідне забруднення, моделювання дозового навантаження.

Soil microflora dose load estimation, formed at the storages sites of radioactive waste in the territory of the ChNPP exclusion zone. Korepanova K., Shavanova K., Illienko V., Ruban Yu., Shpyrka N., Nesterova N., Nikonov S., Parenjuk O.

Radioecological environment of the exclusion zone is quite diverse and vary depending on the distance to the emission source. The so-called “Temporary Radioactive Waste Disposal Facility” (TRWDS), which are burial places of various radioactive materials, mainly the removed upper layers of the soil, worth special attention due to the radiation safety of the exclusion zone. Such burials were made quickly and the buried materials do not have reliable isolation from the environment. Possibilities of using the ERICA tool software package for the modeling of dose loading on the TLPRW ecosystems are analyzed. The expediency of using the aforementioned software to optimize the sampling process at the TRWDS points with different levels of contamination has been determined. The purpose of this work was to analyze the dose loading of soil microbiome TRWDS and to determine the presence of such levels of irradiation that may influence the change in the structure of the microbiome. Methods: specific activity of soil samples from the Buryakivka TRWDS and the Pidlisnyy RWP in 2017 was measured as part of the work. With the help of the computer simulation tool the dosage loads on microorganisms are estimated. Results: it was determined that the highest dose for microorganisms in soils of both RWP is formed at a depth of 0–20 cm, which indicates high rates of vertical migration of radionuclides. The largest contribution to the formation of the absorbed dose is ¹³⁷Cs. Conclusions: ERICA tool software saves considerable time on laboratory research when planning experiments to determine the risk of exceeding the dose limit for ecosystems. Thus, based on exposure dose modeling data at radioactive waste storage facilities, it is possible to hypothesize the possibility of structural changes in the microbiomes of local soils and, consequently, changes in the circulation of substances caused by radionuclide contamination. *Key words:* ionizing radiation, radionuclide contamination, dose loading modeling.

* Автори роботи вдячні колективу Державного спеціалізованого підприємства «Екоцентр», а також його керівнику Сергію Івановичу Кіресву за всебічну адміністративну і методичну підтримку представленої роботи.

Вступ. Навколо Чорнобильської АЕС було створено зону відчуження – унікальну територію площею 2 600 км² з високою щільністю радіонуклідного забруднення, з якої було евакуйоване населення, вивезена велика кількість домашніх тварин, майже повністю припинена будь-яка господарська діяльність. І за відносно короткий час це спровокувало інтенсивні зміни в характері рослинності не тільки колишніх агроценозів, а й природних фітоценозів, зооценозів, мікробоценозів та всього біогеоценозу загалом [1; 2]. Важливими процесами, які тут відбуваються, є зміни у ґрунтовому мікробоценозі [3–6] та функціонування мікрофлори, пов'язане з перерозподілом радіонуклідів у ґрунтовому профілі та зміною їхньої біологічної доступності.

Радіаційні умови зони відчуження досить різноманітні і змінюються залежно від відстані до джерела викиду. Якщо оцінювати загалом, то для територій, які знаходяться в межах 10-км зони відчуження, рівні потужності експозиційної дози перебувають у межах 0,1–2,0 мР/год., а щільність забруднення ґрунту за цим радіонуклідом варіює від 800 до 8000 кБк/м² (може й перевищувати ці значення).

Основна частина радіоактивності сконцентрована у верхньому шарі ґрунту (5–10 см) та лісовій підстилці (в лісах). Є ділянки, на яких інтенсивність вертикальної міграції радіонуклідів у ґрунті дещо вища ніж на інших ділянках зони відчуження. Це місця, які зазнають періодичного підтоплення [7–11].

На особливу увагу, з огляду на радіаційну безпеку території зони відчуження, заслуговують так звані «Пункти тимчасової локалізації радіоактивних відходів», які являють собою місця захоронення різних радіоактивних матеріалів, переважно знятих верхніх шарів ґрунту. Такі захоронення були виконані нашвидкуруч, і поховані матеріали не мають надійної ізоляції від довкілля (ґрунтових вод, атмосферних опадів, вітрів та ін.). На території Чорнобильської зони відчуження налічується близько 800 таких пунктів, в яких поховано понад один мільйон кубічних метрів радіоактивних відходів, загальна активність яких за попередніми даними становить близько 60 кКі.

Визначення ризику перевищення дозових лімітів є важливим завданням у розрізі визначення загального стану екосистеми, її стабільності та здоров'я. Згідно зі звітами ICRP від 2014 р., концепція радіологічного захисту навколишнього середовища має на меті профілактику або зменшення шкідливих впливів іонізуючого опромінення на навколишнє середовище; підтримку біологічного різноманіття; збереження видів, природних середовищ існування, популяцій, екосистем. Інструмент ERICA [12] – це комп'ютеризована, гнучка система програмного забезпечення, яка має структуру, що базується на інтегрованому підході ERICA для оцінки радіологічного ризику для біоти.

Вивчення впливу біорізноманіття і зміни мікрофлори всередині та поблизу об'єктів ядерного паливного циклу (ЯПЦ), як і оцінка біологіч-

них ризиків, пов'язаних з мікрофлорою (в тому числі корозійних ризиків), є важливим завданням сьогодення. Представлена роботи досліджує дозові навантаження на компоненти мікробіому на територіях пунктів зберігання радіоактивних відходів (ПЗРВ) та є частиною роботи щодо загальної оцінки мікробіомів зони відчуження ЧАЕС та впливу радіонуклідного забруднення на їх структуру.

Мета роботи – проаналізувати дозові навантаження на ґрунтові мікробіоми ПЗРВ та визначити наявність таких рівнів опромінення, що можуть мати вплив на зміну структури мікробіому.

Матеріали і методи. Визначення вмісту радіонуклідів у ґрунті проводилося у 2017 році на двох об'єктах: діючому ПЗРВ «Буряківка» і законсервованому ПЗРВ «Підлісний». Необхідність проведення моніторингу на законсервованому об'єкті викликана величиною сумарної активності захоронених РАВ, що оцінюється в діапазоні значень від $2,6 \times 10^{15}$ Бк (інвентаризаційна відомість 1998 р.) до $7,4 \times 10^{17}$ Бк (звіт ВВДПШЕТ, 1991 р.).

Для оцінки щільності забруднення ґрунтів радіонуклідами та їх вертикального розподілу на 10 майданчиках внутрішнього (ПЗРВ «Буряківка») та зовнішнього (ПЗРВ «Підлісний») периметрів кожного з об'єктів контролю було проведено пошаровий відбір проб в інтервалах глибин 0–5; 5–10; 10–20; 20–30; 30–40; 40–50 см. Пробовідбір проводився методом «конверта» п'ятьма уколами (по кутах та у центрі) на площі 25 м² циліндричним пробовідбірником діаметром 50 мм. Далі п'ять відібраних проб об'єднувалися в одну для кожного інтервалу глибин.

Відбір зразків ґрунту проводився спеціальними пробовідбірними пристроями (бурами [13]) діаметром 37 мм (площа пробовідбору 0,001075 м²) на глибину 30 см [13]. На кожній ділянці проби відбирали у 5 точках методом «конверта» з кроком не менше 5 м. Змішаний зразок складався з п'яти індивідуальних, відібраних з площі майданчика, що обстежувався, загального об'єму близько 1000 см³. Змішаний зразок клали в поліетиленовий пакет, який вкладався в другий поліетиленовий пакет. Між поліетиленовими пакетами розміщували паспорт зразка. Потім у лабораторних умовах ґрунт сушили, ретельно перемішували, просіювали через сито з розміром отворів 1 мм та зважували. Маса зразка фіксувалася в паспорті та в каталозі (відомості) пробовідбору. Після цього із проб відбирались навіски для вимірювання активності.

Вміст ¹³⁷Cs у підготовлених пробах визначали за методикою ASTM E181-10 [14] із використанням гамма-спектрометра фірми "ORTEC" (USA) з напівпровідниковим колодязним детектором. Вимірювання проводили із трикратною повторністю. Визначали максимальну та середню концентрації радіонуклідного забруднення. Статистичну обробку результатів проводили за допомогою пакета програм Microsoft Office Excel.

Поглинуті дози, отримані мікроорганізмами за умови існування у забруднених радіонуклідами ґрунтах, було обраховано на основі даних щодо питомої активності радіонуклідів у ґрунті. Для уможливлення обчислень було прийняте спрощення, згідно з яким ґрунт вважається гомогенним повітряно-сухим середовищем. Поглинуті дози для мікроорганізмів були обраховані за допомогою пакета програм ERICA dose assessment tool із фактором невизначеності, що дорівнював 3%.

Результати і обговорення. ПЗРВ «Буряківка». Пробовідбір ґрунту здійснювався на майданчиках внутрішнього периметра ПЗРВ.

Потужність експозиційної дози гамма-випромінювання (ПЕД) на території ПЗРВ у точках пробовідбору варіює (на рівні 1 м від поверхні ґрунту) в межах 30–270 мкР/год., щільність потоку бета-часток на поверхні ґрунту зафіксована на рівні 16–100 бета-част./хв×см².

Виробнича діяльність у межах внутрішнього периметра ПЗРВ приводить до перемішування шарів ґрунту на глибину відбору, що впливає на характер вертикального розподілу радіоактивного забруднення ґрунту. Цим можна пояснити нехарактерні зміни активності ¹³⁷Cs та ⁹⁰Sr з глибиною в деяких точках контролю. Так, частка активності у точках № 9 та № 10, у шарі 30–50 см, дорівнює ¹³⁷Cs – 59–61% та ⁹⁰Sr – 62–71% відповідно.

Щільність радіонуклідного забруднення представлено у таблиці 1. Згідно з отриманими результатами, більшість радіонуклідів мігрувала з верхнього шару ґрунту на глибину 20 та 50 см, що дає змогу стверджувати про досить високу швидкість вертикальної міграції і високу проникність ґрунтів ПЗРВ. Найбільшою була щільність забруднення за ¹³⁷Cs – 670 кБк/м² на всій глибині бурту, хоча, звичайно, найбільший вклад у формування дози будуть вносити альфа-випромінюючі радіонукліди – ²³⁸Pu та ²⁴¹Am.

Склад забруднення ґрунтів у процентному відношенні на ПЗРВ «Буряківка» по вимірювальній групі радіонуклідів у 2017 році був таким:

¹³⁷Cs – 86%; ⁹⁰Sr – 12%; ²³⁹⁺²⁴⁰Pu – 0,4%; ²³⁸Pu – 0,2%; ²⁴¹Am – 1,4%.

Після отримання даних щодо радіонуклідного забруднення було обраховано дози на детритофаги як моделі ґрунтових мікроорганізмів. З отриманих даних видно, що найбільше впливу іонізуючого опромінення піддаються мікробіоти верхнього, 0–5 см шару ґрунту: поглинута доза тут становить 6,58×10⁻² мкГр/год. Найбільший вклад у формування тотальної дози на організм мають ¹³⁷Cs та ²⁴¹Am, із середніми значеннями відповідно 5,5×10⁻² та 7,4×10⁻³ мкГр/год. Важливо зазначити, що в алгоритмі ERICA враховуються коефіцієнти відносної біологічної ефективності (ВБЕ), що становлять 20 для альфа-емітерів та 3 для бета-емітерів. Але навіть за врахування ВБЕ варто зазначити невеликий внесок ²³⁸Pu та ²⁴¹Am у формування загальної дози.

ПЗРВ «Підлісний». ПЗРВ «Підлісний» законсервованій. Відбір проб ґрунту здійснювався у 10 точках контролю, які розташовані навколо ПЗРВ на відстані 15–20 м від контуру огорожі (рис. 2). Результати визначення щільності забруднення ґрунту наведені у таблиці 3.

Потужність експозиційної дози гамма-випромінювання (ПЕД) на рівні 1 м від поверхні ґрунту змінюється в межах 0,14–1,7 мР/год., і в середньому для ПЗРВ становить 0,7 мР/год., щільність потоку бета-часток на поверхні ґрунту зафіксована на рівні 140–1300 бета-част./хв×см². При цьому щільність забруднення радіонуклідами ґрунтового покриву у шарі 0–10 см змінюється у широкому діапазоні значень: для ¹³⁷Cs у межах 310–14900 кБк/м², для ⁹⁰Sr – 110–6000 кБк/м².

Спостерігається значна неоднорідність показників щільності забруднення ґрунту між точками про-

Таблиця 1

Щільність забруднення ґрунту радіонуклідами на ПЗРВ «Буряківка», кБк/м²

Шар ґрунту	Радіонукліди								Сум. активність, кБк/м ²
	¹³⁷ Cs		⁹⁰ Sr		²³⁸ Pu		²⁴¹ Am		
	Макс	Серед.	Макс.	Серед.	Макс.	Серед.	Макс.	Серед.	
Фонові значення	0,52 ¹	0,074 ¹	0,15 ¹	0,037 ¹	0,019 ²	0,0033 ²			0,13
Шар 0–5 см	800	170	78	22	1,1	0,3	7,2	2,4	190
Шар 0–20 см	1400	360	160	51	1,9	0,6	15	6,1	420
Шар 0–50 см	1800	670	320	120	1,9	0,6	15	6,1	800

Таблиця 2

Оцінка дозового навантаження на мікрофлору ґрунтів ПЗРВ «Буряківка», мкГр/год

Шар ґрунту	Радіонукліди								Сум. доза, мкГр/год.
	¹³⁷ Cs		⁹⁰ Sr		²³⁸ Pu		²⁴¹ Am		
	Макс	Серед.	Макс.	Серед.	Макс.	Серед.	Макс.	Серед.	
Шар 0–5 см	2,6×10 ⁻¹	5,5×10 ⁻²	9,4×10 ⁻³	2,7×10 ⁻³	9,1×10 ⁻⁴	2,5×10 ⁻⁴	2,2×10 ⁻²	7,4×10 ⁻³	6,58×10 ⁻²
Шар 0–20 см	4,5×10 ⁻¹	1,2×10 ⁻¹	1,9×10 ⁻²	6,2×10 ⁻³	1,6×10 ⁻³	4,9×10 ⁻⁴	4,6×10 ⁻²	1,9×10 ⁻²	1,4×10 ⁻²
Шар 0–50 см	5,8×10 ⁻¹	2,2×10 ⁻¹	3,8×10 ⁻¹	1,5×10 ⁻²	1,6×10 ⁻³	4,9×10 ⁻⁴	4,6×10 ⁻²	1,8×10 ⁻²	2,5×10 ⁻¹

бовідбору, що пояснюється неоднорідністю первинних випадіннь та проведенням будівельних робіт.

Відсоткове відношення нуклідного складу забруднення ґрунту в районі ПЗРВ «Підлісний» по вимірюваній групі радіонуклідів становило:

^{137}Cs – 69%; ^{90}Sr – 29%; $^{239+240}\text{Pu}$ – 0,5%; ^{238}Pu – 0,2%; ^{241}Am – 1,3%.

Дози, сформовані на території закритого ПЗРВ «Підлісний», істотно перебільшують такі, що сформувались у ПЗРВ «Буряківка», що і стало причиною

закриття «Підлісного». Так, найбільша сумарна доза тут формується у верхніх 20 см ґрунту і становить 7,22 мкГр/год., що є летальною для людини [15], може істотно вплинути на виживаність радіочутливих видів мікроорганізмів, змінюючи структуру ґрунтового мікроценозу. Як і на «Буряківці», найбільший вклад у формування дози має ^{137}Cs , вносячи $1,5 \times 10^1$ мкГр/год. у верхньому 20-см шарі ґрунту.

Таким чином, беручи до уваги високі дозові навантаження на обох пунктах локалізації радіоак-

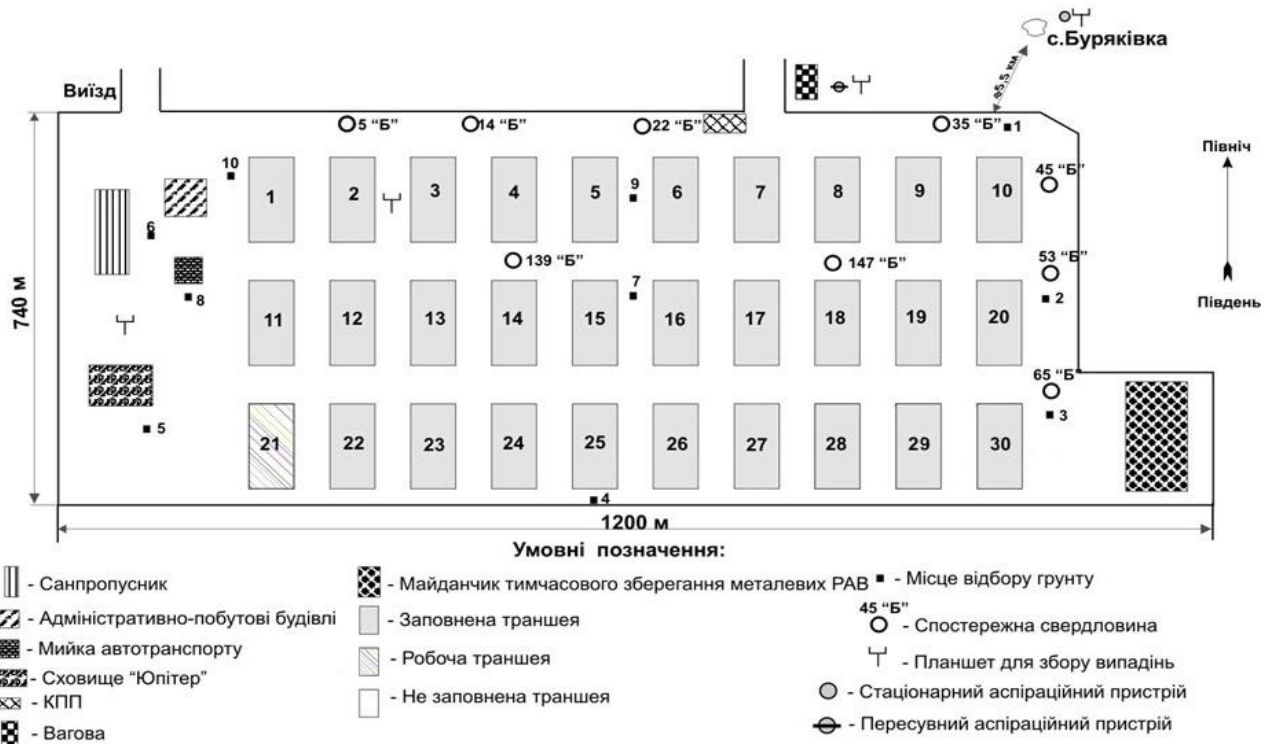


Рис. 1. Схема розміщення пунктів радіаційного контролю в межах ПЗРВ «Буряківка»

Таблиця 3

Щільність забруднення ґрунту на ПЗРВ «Підлісний», кБк/м²

Шар ґрунту	Радіонукліди								Сум. активність, кБк/м ²
	^{137}Cs		^{90}Sr		^{238}Pu		^{241}Am		
	Макс	Серед.	Макс.	Серед.	Макс.	Серед.	Макс.	Серед.	
Фонові значення	0,52 ¹	0.074 ¹	0.15 ¹	0.037 ¹	0,019 ²	0,0033 ²	0,52 ¹	0.074 ¹	0,13
Шар 0–5 см	7800	2700	2400	1080	47	15	180	78	3900
Шар 0–20 см	45300	14700	23500	6300	370	100	1800	530	21900
Шар 0–50 см	83900	27200	42200	11400	370	100	1800	530	39500

Таблиця 4

Оцінка дозового навантаження на мікрофлору ґрунтів ПЗРВ «Підлісний», мкГр/год

Шар ґрунту	Радіонукліди								Сум. доза, мкГр/год.
	^{137}Cs		^{90}Sr		^{238}Pu		^{241}Am		
	Макс	Серед.	Макс.	Серед.	Макс.	Серед.	Макс.	Серед.	
Шар 0–5 см	2,5	$8,7 \times 10^{-1}$	$2,9 \times 10^{-1}$	$1,3 \times 10^{-1}$	$3,9 \times 10^{-2}$	$1,3 \times 10^{-2}$	$5,6 \times 10^{-1}$	$2,4 \times 10^{-1}$	1,25
Шар 0–20 см	$1,5 \times 10^1$	4,7	2,9	$7,6 \times 10^{-1}$	$3,1 \times 10^{-1}$	$8,3 \times 10^{-2}$	$5,6 \times 10^1$	1,6	7,22
Шар 0–50 см	$2,7 \times 10^1$	8,8	5,1	1,3	$3,1 \times 10^{-1}$	$8,3 \times 10^{-2}$	5,6	1,6	$1,18 \times 10^1$

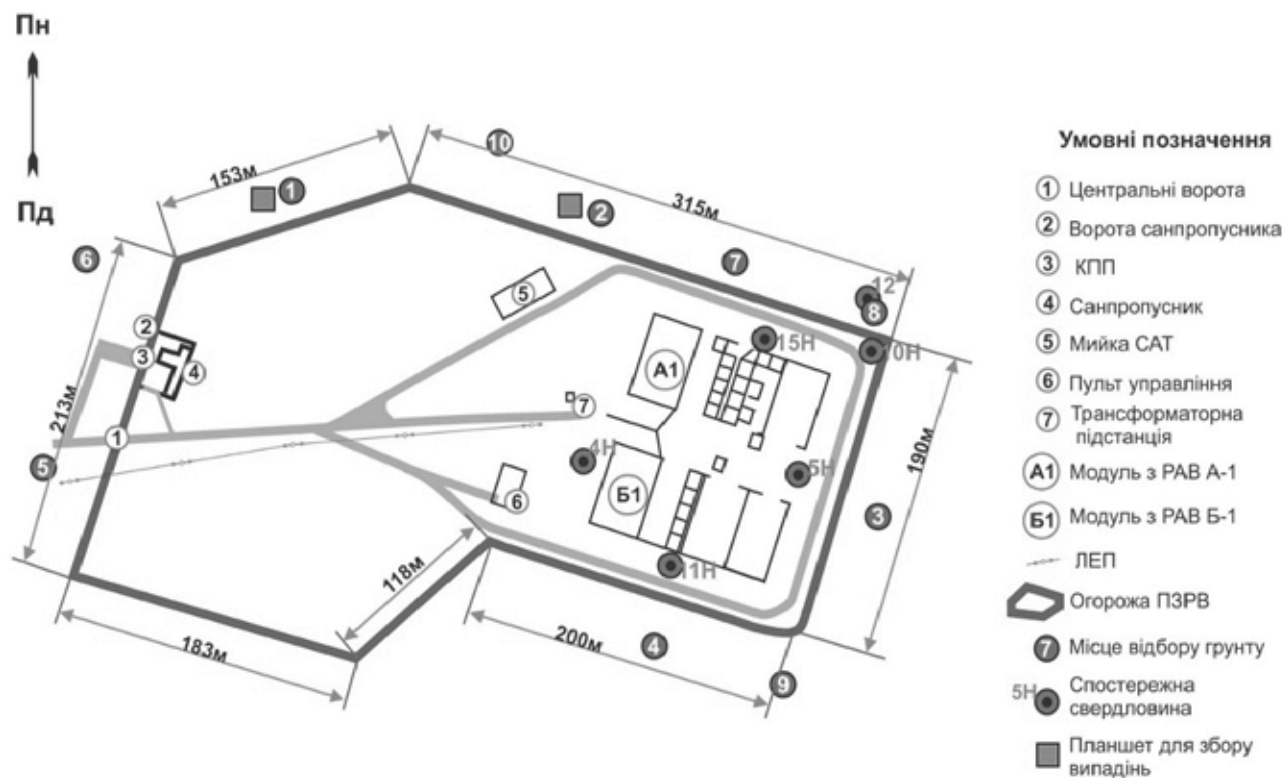


Рис. 2. Схема розміщення пунктів радіаційного контролю в районі ПЗРВ «Підлісний»

тивних відходів, можна будувати гіпотезу щодо можливості структурних змін у мікробіомах локальних ґрунтів, отже, змін у колообігах речовин, викликаних радіонуклідним забрудненням.

Висновки. Програмний продукт ERICA tool дає змогу істотно економити час лабораторних досліджень у разі планування експериментів з визначення

рівня небезпеки перевищення дозового ліміту для екосистем. Так, спираючись на дані моделювання експозиційної дози на пунктах зберігання радіоактивних відходів, можна будувати гіпотезу щодо можливості структурних змін у мікробіомах локальних ґрунтів, отже, змін у колообігах речовин, викликаних радіонуклідним забрудненням.

Література

1. Гудков І.М. Сучасна радіаційна ситуація в Україні та деякі проблеми радіологічної освіти в аграрних навчальних закладах. *Аграрна наука і освіта*. 2001. Том 2, № 3–4. С. 5–14.
2. Кашпаров В.А., Луштин С.М., Хомутинин Ю.В. та ін. Радиоактивное загрязнение 30-км зоны ЧАЭС. 1999.
3. Тугай Т.І., Тугай А.В., Желтоножська М.В. та ін. Закономірності впливу низьких доз опромінення на мікроскопічні гриби. *Ядерна фізика та енергетика*. 2012. Том 13, № 4. С. 396–402.
4. Tugay T.I., Zheltonozhskaya M.V., Sadovnikov L.V. et al. Effects of ionizing radiation on the antioxidant system of microscopic fungi with radioadaptive properties found in the Chernobyl exclusion zone. *Health Physics*. 2011. Vol. 101, No. 4. Pp. 375–382.
5. Григор'єва Л.В., Корчак Г.И., Єрусалимська Л.Ф. Вплив різних рівнів радіаційного забруднення ґрунту на індикаторні та патогенні мікроорганізми. *Довкілля та здоров'я*. 1999. № 1. С. 53–56.
6. Рокитко П.В. Склад бактерій у 10-км зоні ЧАЕС і їх стійкість до γ -випромінювання та інших стресових факторів : дис. на здобуття наук. ступеня канд. біол. наук : спец. 03.00.07 «Мікробіологія». Київ. 149 с.
7. Buldakov L.A., Gus'kova A.K. 15 years after the accident at the Chernobyl Nuclear Power Plant. *Radiatsionnaia biologii, radioecologiya*. 1997. Vol. 42, No. 2. Pp. 228–33.
8. Beresford N.A., Smith J.T. Application of countermeasures: Chernobyl – Catastrophe and Consequences. Springer Berlin Heidelberg.
9. Kryshev I.I., Sazykina T.G., Beresford N.A. Effects on wildlife: Chernobyl – Catastrophe and Consequences. Springer Berlin Heidelberg.
10. Bay I.A., Oughton D.H. Social and economic effects: Chernobyl – Catastrophe and Consequences. Springer Berlin Heidelberg.
11. Alexakhin R., Anspaugh L., Balonov M., et al. Environmental consequences of the Chernobyl accident and their remediation: Twenty years of experience. Report of the Chernobyl Forum Expert group “Environment”. Vienna: International Atomic Energy Agency, 2006.
12. Brown J.E., Alfonso B., Avila R., et al. The ERICA Tool. *Journal of Environmental Radioactivity*. 2008. Vol. 99, No. 9. Pp. 1371–1383.
13. Хомутинин Ю.В., Кашпаров В.А., Жебровская Е.И. Оптимизация отбора и измерений проб при радиоэкологическом мониторинге. Киев : ВИПОЛ, 2001. 160 с.
14. ASTM International. ASTM E181-98, Standard Test Methods for Detector Calibration and Analysis of Radionuclides. West Conshohocken, PA. 1998.
15. Гудков І.М. Радіобіологія : підручник. Херсон : Олді-Плюс, 2016. 504 с.