

Хомутінін Ю. В., Левчук С. Є., Кашпаров В. О.

УДК 631.438.2:631.95: 633.2.03: 637.07

**ЕКСПРЕС ОЦІНКА ЩІЛЬНОСТІ ЗАБРУДНЕННЯ ҐРУНТУ
ІЗОТОПАМИ ПЛУТОНІЮ ЧОРНОБИЛЬСЬКОГО ПОХОДЖЕННЯ****Ю. В. ХОМУТІНІН**, доктор сільськогосподарських наук, старший науковий
співробітник

E-mail: khomutinin@gmail.com

С. Є. ЛЕВЧУК, кандидат біологічних наук

E-mail: slavalevchuk64@gmail.com

В. О. КАШПАРОВ, доктор біологічних наук, професорE-mail: uiar.vak@gmail.com*Український науково-дослідний інститут сільськогосподарської радіології
Національного університету біоресурсів і природокористування України*<https://doi.org/dopovidi2022.04.001>

Анотація. У роботі розглянуто один із підходів знаходження експрес оцінок щільності забруднення ґрунту ізотопами плутонію чорнобильського походження при радіологічному обстеженні сільськогосподарських угідь на південно-західному слідові чорнобильських радіоактивних випадін за межами Чорнобильської зони відчуження. На основі статистичного аналізу багаторічних вимірювань ^{90}Sr , ^{238}Pu і $^{239,240}\text{Pu}$ у пробах ґрунту, виконаних в УкрНДІСГР НУБіП України, розроблено алгоритм отримання експрес оцінок щільності забруднення ґрунту $^{239,240}\text{Pu}$ і ^{238}Pu чорнобильського походження виходячи із щільності забруднення ґрунту ^{90}Sr . Запропонований алгоритм був апробований на прикладі оцінки щільності забруднення ґрунту ізотопами плутонію чорнобильського походження виведених із сільськогосподарського використання сільськогосподарських угідь Народицького району Житомирської області. Результати апробації показали задовільну збіжність отриманих оцінок щільності забруднення ґрунту ізотопами плутонію чорнобильського походження із експериментальними результатами. Запропонований алгоритм отримання експрес оцінок щільності забруднення ґрунту $^{238,239,240}\text{Pu}$ чорнобильського походження може бути складовою частиною системи прийняття рішень щодо перегляду меж зон радіоактивного забруднення та повернення у використання виведених після аварії на ЧАЕС сільськогосподарських угідь.

Ключові слова: щільність радіоактивного забруднення, ^{90}Sr , ^{238}Pu , $^{239,240}\text{Pu}$, Чорнобильська аварія

Вступ.	Унаслідок	областей на площі 54 650 км ² були
безпрецедентної	Чорнобильської	віднесені у 1991 році до різних зон
катастрофи на території України 2293		радіоактивного забруднення [1].
населених пунктів у 74		Тільки площа сільськогосподарських
адміністративних районах 12		угідь зі щільністю забруднення ^{137}Cs

Хомутінін Ю. В., Левчук С. Є., Кашпаров В. О.

понад 37 кБк/м² (станом на 01.01.1995 р.) становила біля 1,1 млн. га [2]. Зокрема, в Житомирській області площа сільськогосподарських угідь зі щільністю забруднення ¹³⁷Cs понад 37 кБк/м² склала 314300 га.

Відповідно до Закону України «Про правовий режим території, що зазнала радіоактивного забруднення внаслідок Чорнобильської катастрофи» [3], територія яка зазнала радіоактивного забруднення поділяється в даний час на 3 зони. У ґрунтах 2-ої зони безумовного (обов'язкового) відселення та 3-ї зони гарантованого добровільного відселення регламентується щільність забруднення ґрунту понад доаварійний рівень ізотопами плутонію чорнобильського походження: 2-а зона - від 3,7 кБк/м² та вище; 3-я зона - від 0,37 кБк/м² до 3,7 кБк/м². У Законі та інших нормативних документах не уточнюється якими саме ізотопами плутонію (²³⁸, ²³⁹, ²⁴⁰, ²⁴¹Pu) може бути забруднений ґрунт, хоча за замовчуванням малися на увазі тільки альфа-випромінюючі радіоізотопи плутонію – ²³⁸, ²³⁹, ²⁴⁰Pu. Контроль вмісту в ґрунті ізоотопів плутонію пов'язаний із відбором проб ґрунту. З огляду на велику плямистість чорнобильських радіоактивних випадінь для отримання репрезентативних оцінок щільності забруднення ґрунту ізотопами плутонію, що випав у складі матриці чорнобильських гарячих паливних

частинок, необхідний відбір великої кількості проб ґрунту та проведення відповідних аналізів [4,5]. Для проведення коректних вимірювань вмісту ізоотопів плутонію в зразках ґрунту потрібне сучасне дороге обладнання. Його придбання і експлуатація пов'язані зі значними матеріальними витратами. В даний час (2022 р.) вартість аналізу по визначанню активності ізоотопів плутонію (²³⁸⁻²⁴⁰Pu) в одному зразку ґрунту умовах становить біля 4500 грн.

За масового обстеження сільськогосподарських угідь проведення аналізів по визначанню активності ізоотопів плутонію призведе до досить високих затрат. У той же час, щільність забруднення території цими ізотопами можна оцінити використовуючи емпіричні співвідношення між радіонуклідами у ґрунті [5]. Такий метод має просторові обмеження, які пов'язані з фізико-хімічними формами радіоактивних випадінь. Хоча такий метод менш точний, проте для деяких випадків він дає задовільні результати.

У цій роботі розглянуто один із підходів знаходження експрес оцінок щільності забруднення ґрунту ізотопами плутонію чорнобильського походження при радіологічному обстеженні сільськогосподарських угідь на південно-західному слідові чорнобильських радіоактивних

Хомутінін Ю. В., Левчук С. Є., Кашпаров В. О.

випадінь за межами чорнобильської зони відчуження (ЧЗВ).

Отримані результати можуть бути складовою частиною системи прийняття рішень щодо перегляду меж зон радіоактивного забруднення та повернення у використання виведених після аварії на ЧАЕС сільськогосподарських угідь.

Об'єкти, методи і початкові дані. Об'єктами дослідження у даній роботі є щільності забруднення ґрунту ізотопами плутонію чорнобильського походження при радіологічному обстеженні сільськогосподарських угідь на південно-західному слідові чорнобильських радіоактивних випадінь. Розглядається співвідношення між щільністю забруднення ґрунту ^{90}Sr і альфа-випромінюючими ізотопами плутонію $^{238,239,240}\text{Pu}$ чорнобильського походження.

Вихідною інформацією для знаходження цього співвідношення послуговували вимірювання ^{90}Sr і $^{238,239,240}\text{Pu}$ у пробах ґрунту, які були

відібрані на південно-західному слідові чорнобильських радіоактивних випадінь на території західної частини Київської, Житомирської та Рівненської областей. Дослідження проводились протягом 1988-2021 років [5, 6]. Вимірювання вмісту ^{90}Sr у пробах ґрунту виконувалось після його радіохімічного виділення з використанням загальноприйнятих методів [7] вимірюванням активності його дочірнього радіонукліда ^{90}Y на бета-спектрометрі СЕБ-70 (АКП, Україна). Визначання активності ізотопів плутонію у пробах ґрунту проводилось з використанням методів їх хімічного виділення та альфа-спектрометрії [7, 8].

Результати вимірювань за 1999-2000 роки були взяті з бази даних УкрНДІСГР [5, 6]. Сукупність даних, що була зібрана і використана в розрахунках, наведена у таблиці 1. Для обробки і аналізу результатів вимірів були використані методи математичної статистики та теорії ймовірностей [9].

Хомутінін Ю. В., Левчук С. Є., Кашпаров В. О.

1. Щільність забруднення ґрунту ^{90}Sr і ізотопами плутонію на момент виміру їх вмісту у пробах ґрунту

№	Координати точок відбору проб		Рік вимірювання активності	Щільність забруднення ґрунту, кБк/м ²		
	довгота	широта		$^{90}\text{Sr}_{\text{сум}}$	$^{238}\text{Pu}_{\text{сум}}$	$^{239,240}\text{Pu}_{\text{сум}}$
1	29,35663	51,07074	2018	1,7±0,2	0,024±0,009	0,118±0,022
2	29,35324	51,07288	2018	1,6±0,2	0,015±0,006	0,084±0,015
3	29,35686	51,07505	2018	1,7±0,2	0,020±0,012	0,125±0,035
4	29,3641	51,07328	2018	2,2±0,2	0,062±0,024	0,177±0,055
5	29,36285	51,07627	2018	1,5±0,2	0,027±0,010	0,126±0,026
6	29,35707	51,07732	2018	1,3±0,2	0,018±0,009	0,133±0,028
7	29,35462	51,06785	2018	2,8±0,3	0,030±0,008	0,119±0,017
8	29,2193	51,23322	2020	48±3	0,096±0,029	0,413±0,083
9	29,21929	51,23319	2020	31±2	0,072±0,022	0,245±0,049
10	29,21891	51,23317	2020	38±2	0,082±0,025	0,360±0,072
11	29,54168	51,1535	1999	4,0±0,4	0,035±0,014	0,109±0,022
12	29,54168	51,1535	2000	13±1	0,036±0,011	0,141±0,028
13	29,12623	51,23115	1999	1,7±0,2	0,045±0,022	0,131±0,038
14	29,70214	51,31558	1999	145±16	1,21±0,12	2,57±0,23
15	29,70108	51,30783	1999	165±15	3,60±0,29	1,94±0,27
16	29,68336	51,31683	1999	184±20	0,60±0,08	7,62±1,07
17	29,68069	51,30628	1999	182±42	0,24±0,07	1,35±0,27
18	29,66858	51,29464	1999	154±14	0,96±0,09	1,85±0,20
19	29,66064	51,31408	1999	103±7	0,60±0,09	1,32±0,19
20	29,66006	51,30461	1999	314±16	0,93±0,02	1,91±0,21
21	29,64761	51,29144	1999	182±11	1,96±0,24	0,95±0,19
22	29,64436	51,30478	1999	359±18	0,98±0,10	3,13±0,63
23	29,6405	51,316	1999	49±3	1,78±0,11	0,78±0,09
24	29,62694	51,30356	1999	229±16	0,48±0,06	1,99±0,40
25	29,62342	51,28956	1999	298±33	0,86±0,069	1,86±0,21
26	28,82833	51,11389	1999	1,4±0,1	0,016±0,003	0,058±0,010
27	28,82335	51,11312	1999	1,0±0,1	0,016±0,005	0,076±0,014
28	28,63733	51,00002	1999	0,8±0,1	0,008±0,004	0,083±0,010
29	28,38177	51,04435	1999	0,20±0,02	0,027±0,006	0,067±0,008
30	28,37694	51,05694	1999	1,8±0,2	0,029±0,025	0,074±0,015
31	28,09815	51,14718	1999	0,8±0,1	0,017±0,006	0,112±0,017
32	27,73327	51,14775	1999	1,3±0,1	0,035±0,025	0,101±0,020
33	27,73327	51,14775	1999	4,4±0,4	0,024±0,006	0,148±0,033
34	27,27652	51,20713	1999	0,50±0,05	0,022±0,008	0,078±0,018
35	26,8885	51,25978	1999	0,40±0,04	0,015±0,007	0,093±0,007
36	26,67292	51,65067	1999	0,9±0,1	0,017±0,006	0,083±0,009
37	26,65208	51,31602	1999	0,40±0,04	0,008±0,003	0,074±0,016
38	26,65208	51,31602	1999	1,5±0,1	0,011±0,003	0,086±0,020
39	25,87683	51,23973	1999	0,50±0,05	0,025±0,006	0,09±0,022
40	25,59965	51,44527	1999	0,6±0,1	0,009±0,003	0,092±0,015

Результати і обговорення. забруднення ізотопами плутонію з Територія України зазнала двох основних джерел – глобальні

Хомутінін Ю. В., Левчук С. Є., Кашпаров В. О.

радіоактивні випадіння спричинені випробуваннями ядерної зброї в атмосфері, найінтенсивніші з яких були проведені у 1961-1962 рр. та радіоактивні випадіння спричинені аварією на ЧАЕС. У чорнобильських радіоактивних випадіннях активність ^{238}Pu була приблизно у 1,9 рази менша в порівнянні з активністю $^{239,240}\text{Pu}$ [10]. Глобальні випадіння продуктів ядерних вибухів мали виражений широтний характер та були в основному представлені $^{239,240}\text{Pu}$ з незначним вмістом ^{238}Pu [11]. З часом, незалежно від місця та висоти вибуху його радіоактивні продукти перемішуються в стратосфері і встановлюється порівняльна сталість рівнів глобальних радіоактивних випадінь. За даними доповіді, представленої в ООН Комітетом із захисту від атомної радіації (UNSCEAR), глобальні випадіння ізотопів плутонію у північній півкулі між 40° та 50° п. ш. складали перед Чорнобильською катастрофою близько 58 Бк/м^2 [12]. Щільність забруднення глобальним $^{239,240}\text{Pu}_{\text{гл}}$ території Республіки Білорусь у доаварійний період (1958-1962 рр.) варіювала у межах $53\text{-}58 \text{ Бк/м}^2$ при середньому значенні $^{239,240}\text{Pu}_{\text{гл}} = 53 \pm 17 \text{ Бк/м}^2$ [13]. В ЧЗВ середньозважена щільність забруднення глобальним $^{239,240}\text{Pu}_{\text{гл}}$ на території України склала $^{239,240}\text{Pu}_{\text{гл}} = 52 \pm 10 \text{ Бк/м}^2$ [5], що добре узгоджується з наведеними вище результатами, які ми будемо використовувати у даній роботі для

отримання різних оцінок. Тоді щільність забруднення ґрунту ізотопами $^{239,240}\text{Pu}$ чорнобильського походження дорівнюватиме $^{239,240}\text{Pu}_{\text{чор}} = ^{239,240}\text{Pu}_{\text{сум}} - ^{239,240}\text{Pu}_{\text{гл}}$. При великих щільності забруднення в ЧЗВ різниця між $^{239,240}\text{Pu}_{\text{сум}}$ і $^{239,240}\text{Pu}_{\text{чор}}$ буде не суттєва. Однак на території Житомирської області ця різниця буде вже значущою.

Індикатором джерел забруднення плутонієм території може слугувати відношення його ізотопів $k = ^{238}\text{Pu} / ^{239,240}\text{Pu}$ [5,14,15]. Для глобальних випадінь у північній півкулі цей коефіцієнт у 1970 р. становив $0,034$ [11], а для чорнобильських радіоактивних випадінь у 1986 р. - $0,53$ [10]. Враховуючи розпад радіонуклідів, це співвідношення у 2022 році буде рівним **0,023** та **0.47**. У цьому випадку оцінка щільності забруднення ґрунту глобальними випадіннями $^{238}\text{Pu}_{\text{гл}}$ на 2022 рік становитиме **1,2 Бк/м²**.

Наведені вище оцінки щільності забруднення ґрунту, що обумовлені глобальними випадіннями ^{238}Pu та $^{239,240}\text{Pu}$, дозволяють оцінити для південно-західного сліду щільність забруднення ґрунту радіонуклідами ^{238}Pu і $^{239,240}\text{Pu}$ чорнобильського походження: $^{238}\text{Pu}_{\text{чор}} = ^{238}\text{Pu}_{\text{сум}} - 0,0012 \text{ кБк/м}^2$ і $^{239,240}\text{Pu}_{\text{чор}} = ^{239,240}\text{Pu}_{\text{сум}} - 0,052 \text{ кБк/м}^2$. Результати статистичної обробки показують, що відмінність в оцінках аналізованого параметра, отриманого за результатами вимірювань виконаних

Хомутінін Ю. В., Левчук С. Є., Кашпаров В. О.

на ранній стадії аварії (1999-2000 роки) та на пізній стадії (2018-2021 роки) статистично не значущі. Ці виміри доповнюють одне одного.

Метою даної роботи є отримання експрес оцінок щільності забруднення ґрунту ізотопами $^{238,239,240}\text{Pu}$ чорнобильського походження, виходячи із щільності забруднення ґрунту ^{90}Sr на території південно-західного сліду. Це особливо важливо при радіологічному обстеженні територій, коли відбирається багато проб ґрунту. Активності $^{90}\text{Sr}_{\text{сум}}$ і $^{238}\text{Pu}_{\text{сум}}$ (таблиця 1), були перераховані з урахуванням радіоактивного розпаду радіонуклідів на 2022 рік. Нижче (рисунок 1) наведено результати статистичного аналізу цих даних. Знайдена лінійна залежність між радіонуклідами виду $^{238,239,240}\text{Pu}_{\text{чор}} = \alpha \cdot ^{90}\text{Sr}_{\text{сум}}$, з коефіцієнтом кореляції $R=0,74$ при $\alpha=0,024\pm0,003$. Залишкове стандартне відхилення ($s_{\text{зал}}$) становить 1,2. Отримане значення коефіцієнта α у 1,5 рази

менше відношення активності $^{238,239,240}\text{Pu} / ^{90}\text{Sr} = 0.036$ у чорнобильському ядерному паливі та паливній компоненті чорнобильських радіоактивних випадінь станом на 2022 рік, що обумовлено наявністю у сумарній активності $^{90}\text{Sr}_{\text{сум}}$ конденсаційної складової чорнобильських радіоактивних випадінь за межами ЧЗВ [5,10], а також глобальних випадінь стронцію після випробувань ядерної зброї на рівні менше 1 кБк/м² [16].

Незважаючи на те, що співвідношення між ^{90}Sr і $^{238,239,240}\text{Pu}_{\text{чор}}$ має не високу кореляцію, отримана залежність $^{238,239,240}\text{Pu}_{\text{чор}} = \alpha \cdot ^{90}\text{Sr}_{\text{сум}}$ дозволяє, в першому наближенні, отримати експрес оцінки щільності забруднення ґрунту $^{238,239,240}\text{Pu}_{\text{чор}}$ на сільськогосподарських угіддях, які розташовані на південно-західному слідові чорнобильських випадінь станом на 2022 рік.

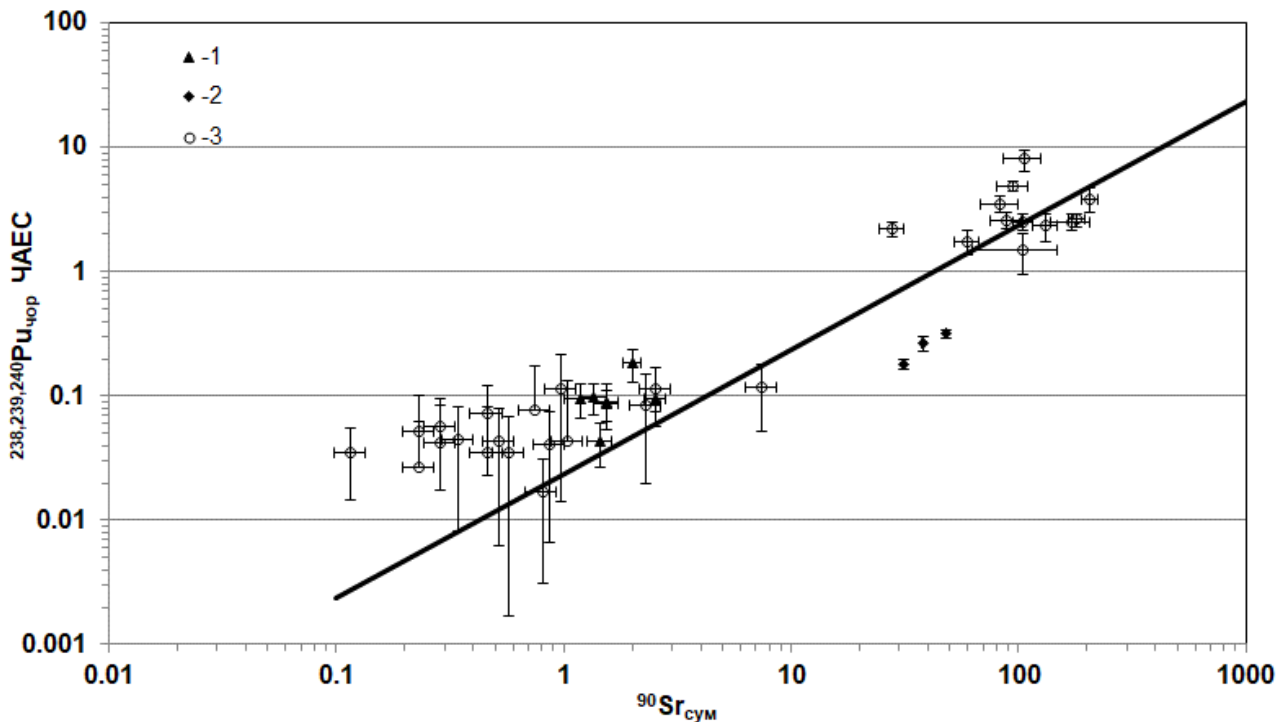


Рис. 1. Співвідношення між щільністю забруднення ґрунту $^{90}\text{Sr}_{\text{сум}}$ (кБк/м²) і $^{238,239,240}\text{Pu}_{\text{чор}}$ (кБк/м²) у 2022 р.: 1 - поле південніше с. Рагівка (2018); 2 - поле на схід від с. Христинівка (2018); 3 - банк даних УкрНДІСГР (1999)

Розглянемо кілька прикладів. У 2021 році співробітниками УкрНДІСГР в околицях с. Христинівка було проведено радіологічне обстеження 6 полів, виведених з господарського використання. На базі отриманих результатів було побудовано карти щільності їх забруднення ^{90}Sr (рисунок 2), а також для кожного поля оцінені середні значення цього параметра (таблиця 2). На основі запропонованої експрес методики були зроблені оцінки середньої щільності забруднення цих полів

ізотопами плутонію чорнобильського походження (таблиця 2). З наведених результатів видно, що на полях №1-3 відповідно до Закону [3] спостерігається перевищення критерію 3-ї зони за щільністю забруднення території ізотопами стронцію: $5,5 \text{ кБк/м}^2 \leq ^{90}\text{Sr} < 111 \text{ кБк/м}^2$, але при цьому тільки на полі №1 щільність забруднення території ізотопами плутонію перевищує критерій 3-ї зони: $0,37 \text{ кБк/м}^2 \leq ^{238,239,240}\text{Pu} < 3,7 \text{ кБк/м}^2$ (таблиця 2).

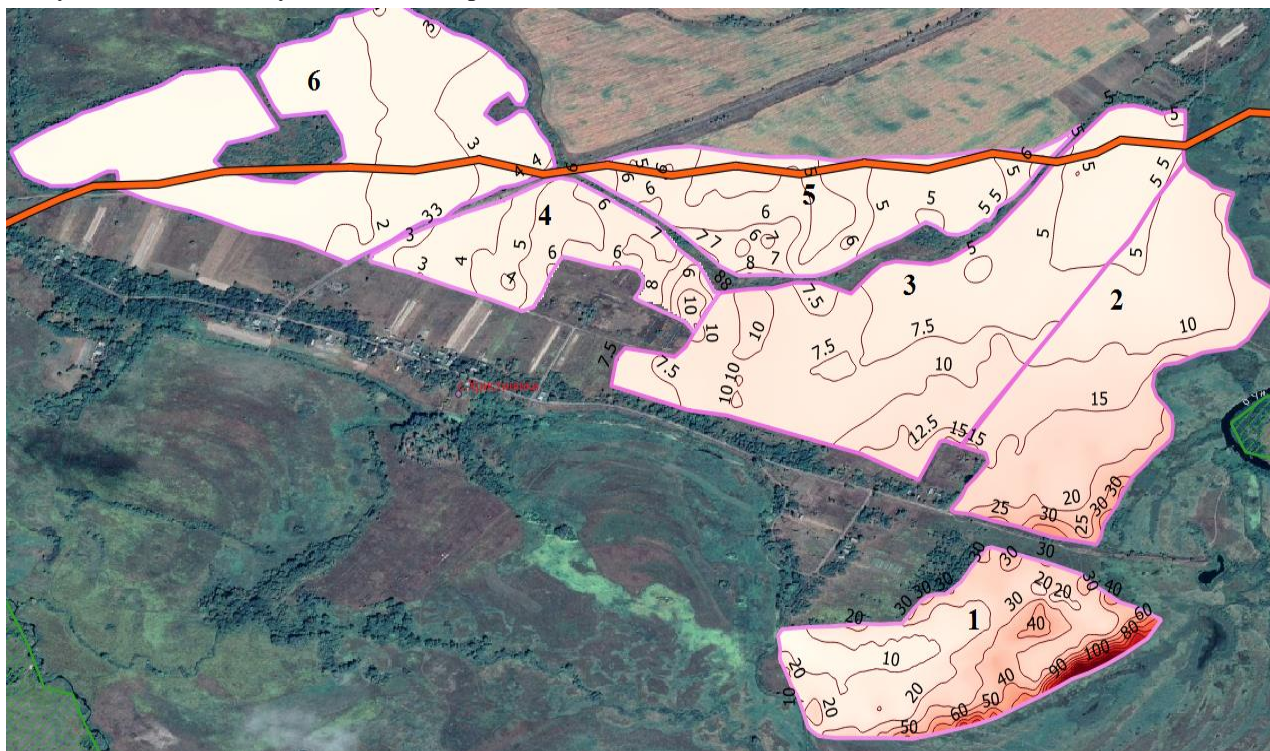


Рис. 2. Забруднення виведених з господарського використання сільськогосподарських угідь в околицях села Христинівка ^{90}Sr станом на 2022 рік, (кБк/м²).

2. Середні геометричні щільності та їх геометричні стандартні відхилення забруднення виведених із сільськогосподарського використання полів ^{90}Sr і ізотопами плутонію чорнобильського походження на 2022 рік

№ поля	^{90}Sr		Ізотопи плутонію чорнобильського походження, $^{238,239,240}\text{Pu}$	
	GM, кБк/м ²	GSD	GM, кБк/м ²	GSD
1	21,76	1,97	0,49	1,99
2	11,31	1,95	0,25	1,97
3	7,00	1,95	0,16	1,97
4	5,08	1,95	0,11	1,97
5	5,08	1,95	0,11	1,97
6	1,89	1,95	0,04	1,97

На підставі отриманого співвідношення між щільністю забруднення території радіоізотопами плутонію та стронцію $^{238,239,240}\text{Pu}_{\text{чор}} = 0,024 \cdot ^{90}\text{Sr}_{\text{сум}}$, можна зробити дуже важливий висновок. Критерій 3-ї зони по щільності

забруднення території стронцієм $5,5 \text{ кБк/м}^2 \leq ^{90}\text{Sr} < 111 \text{ кБк/м}^2$ буде відповідати за межами ЧЗВ щільності забруднення території ізотопами плутонію $0,13 \text{ кБк/м}^2 \leq ^{238,239,240}\text{Pu}_{\text{чор}} < 2,7 \text{ кБк/м}^2$, що гарантує дотримання критерію $0,37 \text{ кБк/м}^2 \leq ^{238,239,240}\text{Pu} <$

Хомутинін Ю. В., Левчук С. Є., Кашпаров В. О.

3,7 кБк/м² [3]. У цьому випадку виконання критеріїв радіоекологічного зонування території після Чорнобильської катастрофи по щільності забруднення стронцієм гарантує виконання критеріїв по ізотопах плутонію і немає необхідності у проведенні тривалих та дорогих аналізів по визначенню їх активності у пробах ґрунту.

Висновки

На основі статистичного аналізу багаторічних вимірювань ⁹⁰Sr, ²³⁸Pu і ^{239,240}Pu у пробах ґрунту, виконаних в УкрНДІСГР НУБіП України, розроблено алгоритм отримання експрес оцінок щільності забруднення ґрунту ізотопами плутонію чорнобильського походження (^{238,239,240}Pu). Основу цього алгоритму становить емпіричне співвідношення між щільністю забруднення ґрунту ⁹⁰Sr та ізотопами

Список використаних джерел

1. Радіологічний стан територій, віднесених до зон радіоактивного забруднення (у розрізі районів) / К.: Міністерство України з питань надзвичайних ситуацій та у справах захисту населення від наслідків Чорнобильської катастрофи України, 2008. 49 с.
2. Досвід подолання наслідків Чорнобильської катастрофи (сільське та лісове господарство)/ П.П. Надточій та ін.; К.: «Світ», 2003. 372 с.
3. Закон України "Про правовий режим території, що зазнала радіоактивного забруднення внаслідок Чорнобильської катастрофи" від 27.02.91 р. № 791а-ХІІ.- Відомості Верховної Ради УРСР (ВВР), 1991, № 16, ст.198, <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/791%D0%B0-127>.

^{238,239,240}Pu чорнобильського походження.

Запропонований метод валідовано на виведених із господарського використання сільськогосподарських угіддях Народицького району Житомирської області. Результати валідації показали задовільну збіжність отриманих оцінок щільності забруднення ґрунту ізотопами плутонію чорнобильського походження із експериментальними результатами.

Запропонований алгоритм отримання експрес оцінок щільності забруднення ґрунту ^{238,239,240}Pu чорнобильського походження може бути складовою частиною системи прийняття рішень щодо перегляду меж зон радіоактивного забруднення та повернення у використання виведених після аварії на ЧАЕС сільськогосподарських угідь.

4. Khomutinin Yu., Fesenko S., Levchuk S., Zhebrovska K., Kashparov V. Optimising sampling strategies for emergency response: Soil sampling. *Journal of Environmental Radioactivity*. 2020. 222, 106344 <https://doi.org/10.1016/j.jenvrad.2020.106344>
5. Kashparov V.A., Lundin S.M., Zvarich S.I., Yoschenko V.I., Levchuk S.E., Khomutinin Yu.V., Maloshtan I.N., Protsak V.P. Territory contamination with the radionuclides representing the fuel component of Chernobyl fallout. *The Science of the Total Environment*. 2003. 317(1-3), 105-119. [https://doi.org/10.1016/S0048-9697\(03\)00336-X](https://doi.org/10.1016/S0048-9697(03)00336-X)
6. Kashparov V., Levchuk S., Zhurba M., Protsak V., Khomutinin Yu., Beresford N.A., Chaplow J.S. Spatial datasets of radionuclide contamination in the Ukrainian

Хомутинін Ю. В., Левчук С. Є., Кашпаров В. О.

Chernobyl Exclusion Zone. *Earth System Science Data (ESSD)*. 2018. 10, 339-353. <https://doi.org/10.5194/essd-10-339-2018>

7. Павлоцкая Ф.И. Основные принципы радиохимического анализа объектов природной среды и методы определения радионуклидов стронция и трансурановых элементов. *Журнал аналитической химии*. 1997. 52(2) 126.

8. ДСТУ ISO 18589-4:2015 Вимірювання радіоактивності у довкіллі. Ґрунт. Частина 4. Вимірювання ізотопів плутонію (плутонію 238 та плутонію 239 + 240) методом альфа-спектрометрії

9. Четыркин Е.М., Калихан И.Л. Вероятность и статистика. М.: Финансы и статистика, 1982. 319 с.

10. Kashparov, V., Levchuk, S., Zhurba, M., Protsak, V., Beresford, N.A., Chaplow, J.S. Spatial radionuclide deposition data from the 60 km radial area around the Chernobyl Nuclear Power Plant: results from a sampling survey in 1987. *Earth System Science Data (ESSD)*. 2020. 12, 1861–1875, <https://doi.org/10.5194/essd-12-1861-2020>

11. Perkins R.W., Thomas C.W. Worldwide fallout. In *Transuranic elements in the Environment: Tech. Inf. Center US Department of Energy: DOE/TIC_22880* / ed. W.C. Hanson. – Washington, D.C. 1980. P. 53–82.

12. UNSCEAR Report to the General Assembly of United Nations with Annexes. – New York: UN, 1982. P. 228, p. 238.

13. Конопля Е. Ф., Кудряшов В. П., Миронов В. П. Трансурановые элементы на территории Беларуси / Минск: Белорусская наука, 2006. 192 с.

14. Dufa C., Renaud P. ^{238}Pu and $^{239+240}\text{Pu}$ inventory and distribution through the lower Rhone valley terrestrial environment (Southern France) / *Science of the Total Environment*. 2005. V. 348. P. 164–172

15. Michel H., Gasparro J., Barci_Funel G., Dalmaso J., Ardisson G., Sharovarov G. Radioanalytical determination of actinides and fission products in Belarus soils / *Talanta*. 1999. V. 48. P. 821–825.

16. Табачний Л.Я. та ін.. Атлас України. Радіоактивне забруднення. ТОВ «Інтелектуальні Системи ГЕО». 2002. 2008.

1. Radiological status of territories assigned to areas of radioactive contamination (in terms of districts) / К.: Ministry of Ukraine for Emergencies and Protection of the Population from the Consequences of the Chernobyl Catastrophe of Ukraine, 2008. 49 p.

2. The experience of overcoming the consequences of the Chernobyl disaster (agriculture and forestry) / P.P. Nadtochiy and others; К.: "World", 2003. 372 p.

3. Law of Ukraine "On the legal regime of the territory affected by radioactive contamination as a result of the Chernobyl disaster" of 27.02.91 № 791a-XII.- Information of the Verkhovna Rada of the USSR (VVR), 1991, № 16, p.198, <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/791%D0%B0-127>.

4. Khomutinin Yu., Fesenko S., Levchuk S., Zhebrowska K., Kashparov V. (2020). Optimising sampling strategies for emergency response: Soil sampling. *Journal of Environmental Radioactivity*. 222, 106344 <https://doi.org/10.1016/j.jenvrad.2020.106344>

5. Kashparov V.A., Lundin S.M., Zvarich S.I., Yoschenko V.I., Levchuk S.E., Khomutinin Yu.V., Maloshtan I.N., Protsak V.P. (2003). Territory contamination with the radionuclides representing the fuel component of Chernobyl fallout. *The Science of the Total Environment*. 317(1-3), 105-119. [https://doi.org/10.1016/S0048-9697\(03\)00336-X](https://doi.org/10.1016/S0048-9697(03)00336-X)

6. Kashparov V., Levchuk S., Zhurba M., Protsak V., Khomutinin Yu., Beresford N.A., Chaplow J.S. (2018). Spatial datasets of radionuclide contamination in the Ukrainian Chernobyl Exclusion Zone. *Earth System Science Data (ESSD)*. 10, 339-353. <https://doi.org/10.5194/essd-10-339-2018>

7. Pavlotskaya F.I. (1997). Basic principles of radiochemical analysis of environmental objects and methods for determining radionuclides of strontium and transuranium elements. *Journal of Analytical Chemistry*. 52(2) 126.

8. DSTU ISO 18589-4: 2015 Measurement of radioactivity in the environment. Soil. Part 4. Measurement of plutonium isotopes (plutonium 238 and plutonium 239 + 240) by alpha spectrometry

References

Хомутінін Ю. В., Левчук С. Є., Кашпаров В. О.

9. Chetyrkin E.M., Kalikhan I.L. (1982). Probability and statistics. M.: Finance and statistics, 319 p..

10. Kashparov V., Levchuk S., Zhurba M., Protsak, V. Beresford, N.A., Chaplow J.S. (2020). Spatial radionuclide deposition data from the 60 km radial area around the Chernobyl Nuclear Power Plant: results from a sampling survey in 1987. *Earth System Science Data (ESSD)*. 12, 1861–1875, <https://doi.org/10.5194/essd-12-1861-2020>

11. Perkins R.W., Thomas C.W. (1980). Worldwide fallout. In *Transuranic elements in the Environment: Tech. Inf. Center US Department of Energy: DOE/TIC_22880* / ed. W.C. Hanson. Washington, D.C. P. 53–82.

12. UNSCEAR Report to the General Assembly of United Nations with Annexes. – New York:UN, 1982. P. 228, p. 238.

13. Hemp E. F., Kudryashov V. P., Mironov V. P. (2006). *Transuranium elements on the territory of Belarus*. Minsk: Belarusian Science, 192 p.

14. Dufa C., Renaud P. (2005). ^{238}Pu and $^{239+240}\text{Pu}$ inventory and distribution through the lower Rhone valley terrestrial environment (Southern France). *Science of the Total Environment*. V. 348. P. 164–172

15. Michel H., Gasparro J., Barci_Funel G., Dalmasso J., Ardisson G., Sharovarov G. (1999). Radioanalytical determination of actinides and fission products in Belarus soils. *Talanta*. V. 48. P. 821–825.

16. Tobacco L.Ya. etc. (2002). *Atlas Ukraine. Radioactive contamination*. LLC "Intelligent GEO Systems". 2008.

EXPRESS ESTIMATION OF SOIL POLLUTION DENSITY BY PLANTING ISOTOPES OF CHERNOBYL ORIGIN

Yu. Khomutinin , S. Levchuk , V. Kashparov

Abstract. *The article considers an approach of finding a rapid estimate of soil contamination density of plutonium isotopes in a radiological survey of agricultural lands on the south-western trace of Chernobyl radioactive fallout outside the Chernobyl Exclusion Zone. An algorithm based on a linear correlation between values of ^{90}Sr and $^{238,239,240}\text{Pu}$ activity in soil samples was developed. The algorithm was tested during a radiological field survey of abandoned lands in Narodychi district. The results of the approbation showed a satisfactory convergence of obtained estimates of soil contamination with plutonium isotopes of Chernobyl origin with experimental results. The proposed algorithm may be a part of the decision-making system at reviewing the boundaries of radioactive contamination zones and returning in the use agricultural lands that were abandoned after the Chernobyl accident.*

Key words: *density of radioactive contamination, ^{90}Sr , ^{238}Pu , $^{239,240}\text{Pu}$, Chernobyl accident*