

Ю. В. Хомутінін*, М. А. Журба, С. Є. Левчук,
О. В. Косарчук, С. В. Поліщук, В. В. Павлюченко

Український науково-дослідний інститут сільськогосподарської радіології
Національного університету біоресурсів і природокористування України, Київ, Україна

*Відповідальний автор: khomutinin@gmail.com

ПРОГНОЗУВАННЯ НАДХОДЖЕННЯ РАДІОНУКЛІДІВ ^{137}Cs І ^{90}Sr У СІЛЬСЬКОГОСПОДАРСЬКІ КУЛЬТУРИ

За результатами радіологічного обстеження на виведених із господарського використання сільськогосподарських угідь Народицького району Житомирської області побудовано карти щільності забруднення ґрунту ^{137}Cs . Оцінено статистичні характеристики щільності забруднення ґрунту (медіана, геометричне стандартне відхилення, верхня межа для $P = 0,9$) радіонуклідами ^{137}Cs , ^{90}Sr та ізотопами плутонію. Наведено прогноз імовірного вмісту радіонуклідів ^{137}Cs , ^{90}Sr (медіана, геометричне стандартне відхилення, верхня межа для $P = 0,9$) в урожаї характерних для цього регіону сільськогосподарських культур та ризику їх перевищення встановлених нормативів. Надано рекомендації щодо повернення цих угідь в господарське використання.

Ключові слова: щільність радіоактивного забруднення ^{137}Cs і ^{90}Sr , картографування, прогноз вмісту радіонуклідів ^{137}Cs , ^{90}Sr в урожаї.

1. Вступ

Після Чорнобильської аварії до території зони безумовного (обов'язкового) відселення (ЗБ(О)В) були віднесені землі (площа понад 2 тис. км²), «на яких неможливе подальше проживання населення, одержання сільськогосподарської та іншої продукції, продуктів харчування, що відповідають республіканським та міжнародним допустимим рівням вмісту радіоактивних речовин, або які недоцільно використовувати за екологічними умовами» (Закон України «Про правовий режим території, що зазнала радіоактивного забруднення внаслідок Чорнобильської катастрофи» [1]). На цій території знаходяться 86 населених пунктів з прилеглими сільськогосподарськими угіддями. Необхідно відзначити, що частина територій України була виведена з господарського використання не за радіологічними критеріями, а виходячи зі сформованих на той час соціально-економічних умов.

За час, що пройшов після аварії, радіологічна ситуація стабілізувалася. Тільки за рахунок радіоактивного розпаду щільність забруднення території ^{137}Cs та ^{90}Sr зменшилася більш ніж у 2 рази. Унаслідок цього, а також автореабілітаційних процесів знизилися рівні радіоактивного забруднення продукції, що дозволяє в деяких випадках розглядати питання повернення виведених сільськогосподарських угідь у господарське використання. Основою для радіологічної реабілітації забруднених радіонуклідами сільськогосподарських угідь є результати радіологіч-

ного моніторингу, який передбачає визначення щільності забруднення сільськогосподарських угідь ^{137}Cs , ^{90}Sr та ізотопами плутонію.

Реабілітація забруднених радіонуклідами сільськогосподарських угідь та повернення їх у господарський оборот є одним з найбільш актуальних і складних завдань. Критерієм можливості повернення в господарський оборот забруднених радіонуклідами сільськогосподарських угідь є величини індивідуальних доз жителів, які будуть споживати вироблену на даних угіддях продукцію. Похідними величинами від цієї дози є допустимі рівні вмісту радіонуклідів у продуктах харчування [2]. Сільськогосподарські угіддя є засобом виробництва рослинницької продукції, і у віддалений період після аварії ступінь забруднення радіонуклідами цієї продукції повністю визначається забрудненням ними ґрунту сільськогосподарського угіддя. У даній роботі можливість повернення забруднених радіонуклідами сільськогосподарських угідь оцінюється на основі прогнозування надходження радіонуклідів ^{137}Cs і ^{90}Sr у товарну продукцію сільськогосподарських культур та відповідності результатів прогнозу вимогам ДР-2006 [2].

2. Основні положення, вихідні дані та методи прогнозування

На даний час забруднення ґрунту радіонуклідами повністю визначає вміст їх у рослинах. У цій роботі характеристикою забруднення ґрунту радіонуклідами є щільність забруднення (кБк/м²),

© Ю. В. Хомутінін, М. А. Журба, С. Є. Левчук,
О. В. Косарчук, С. В. Поліщук, В. В. Павлюченко, 2021

а характеристикою забруднення ними урожаю є їхня питома активність (Бк/кг). Ці характеристики для конкретного сільськогосподарського угіддя є випадковими величинами, які мають відповідні логнормальні закони розподілу ймовірностей $f(x)$ як при квазірівномірному [3 - 6], так і при нерівномірному забрудненні поля радіонуклідами [7 - 9]:

$$f(X) = \frac{1}{\sqrt{2\pi} \cdot X \cdot s} e^{-\frac{1}{2} \left(\frac{\ln(X) - \mu}{s} \right)^2}, \quad (1)$$

де X – значення характеристики радіоактивного забруднення; μ і s – середнє значення і стандартне відхилення логарифма величини X . Середнє геометричне (медіана) величини X дорівнює $GM = \exp(\mu)$, а стандартне геометричне відхилення – $GSD = \exp(s)$.

Якщо A щільність забруднення поля радіонуклідами, то відповідні репрезентативні оцінки GM і GSD можна отримати на основі результатів моніторингу за формулами

$$GM = \exp\left(\sum_1^N \omega_i \cdot \ln(A_i)\right),$$

$$GSD = \exp\left(\sum_1^N \omega_i \cdot (\ln(A_i) - \ln(GM))^2\right), \quad (2)$$

де $\omega_i = W_i/W_{\text{пол}}$ – вагові коефіцієнти $\sum \omega_i = 1$; $W_{\text{пол}}$ – площа поля, га; W_i – площа поля із щільністю забруднення X_i , га; N – кількість вимірювань.

Для знаходження вагових коефіцієнтів ω_i необхідна інформація щодо щільності забруднення поля радіонуклідом. Побудова такої репрезентативної карти вимагає великого числа вимірювань, що охоплюють усе поле. Використання тільки прямих вимірювань щільності забруднення поля пов'язане з великими витратами. При проведенні радіологічного моніторингу ми, як правило, маємо обмежену (невелику) кількість таких вимірювань, що не дозволяє побудувати репрезентативну карту щільності забруднення поля радіонуклідом. У даній роботі для побудови відповідних карт щільності забруднення використовується вся сукупність прямих і непрямих вимірювань, що по-різному характеризують щільність забруднення поля радіонуклідом, з використанням кореляційних зв'язків між ними. Обґрунтування даного підходу детально викладено в роботах [8 - 11]. Такий підхід був успішно реалізований при побудові карт поширення стронцієвого сліду в ближній зоні аварії на ЧАЕС [12] та карт забруднення території радіонуклідами, що входять у паливну складову чор-

нобильських випадань [13]. Для щільності забруднення поля ^{137}Cs це кореляційний зв'язок між потужністю амбієнтного еквівалента дози (ПАЕД) гамма-випромінювання із щільністю забруднення ґрунту ^{137}Cs . Для щільності забруднення поля ^{90}Sr це кореляційна залежність між величинами щільності забруднення ґрунту ^{137}Cs та ^{90}Sr . Для щільності забруднення поля ізотопами плутонію ($^{238,239,240}\text{Pu}$) це її кореляційний зв'язок із щільністю забруднення ^{90}Sr . Також враховується той факт, що ці залежності визначаються типом радіоактивних випадань і є різними (специфічними) для кожного сліду чорнобильських радіоактивних випадань.

У роботах [8 - 11] нами показано, що таке завдання побудови репрезентативних карт щільності забруднення поля радіонуклідами успішно вирішується методами геостатистичної інтерполяції з використанням регресійного крігінга [14], який реалізований у модулях сучасних ГІС (QGIS, SAGA GIS). Однак включення цих модулів у створюваний реєстр сільськогосподарських угідь ЗБ(О)В ми вважаємо недоцільним. Дані програмні продукти знаходяться у відкритому доступі і їх необхідно використовувати як доповнення при обробці результатів моніторингу і прогнозуванні радіологічної ситуації на угіддях.

При побудові карти щільності забруднення поля радіонуклідами методами геостатистичної інтерполяції поле розбивається на N елементарних однакових ділянок (dx, dy), які в силу їхньої малості вважаємо безградієнтними за забрудненням. Для кожної такої ділянки обчислюється значення щільності забруднення ґрунту радіонуклідом A_i . Значення середнього геометричного (медіани) щільності забруднення поля радіонуклідом дорівнює $GM = \exp\left(\frac{1}{N} \sum_1^N \ln(A_i)\right)$.

Якщо для побудови карти щільності забруднення поля радіонуклідом використовувалися результати тільки прямих вимірювань, геометричне стандартне відхилення обчислюється як $GSD = \exp\left(\sqrt{s_0^2 + s_c^2}\right)$, де s_0 – усереднена оцінка стандартного відхилення $\ln(A)$ на безградієнтній за забрудненням ділянці; s_c – стандартне відхилення $\ln(A)$ на нерівномірно забруднених угіддях між безградієнтними по забрудненню ділянками (dx, dy). У ГІС (QGIS, SAGA GIS) значення s_c обчислюється автоматично.

При побудові карт щільності забруднення ґрунту за сукупністю прямих і непрямих вимірювань відповідно геометричне стандартне відхилення GSD обчислюється так, як це викладено в роботі [11] залежно від розрахункових випадків.

Основною радіологічною характеристикою сільськогосподарських угідь ЗБ(О)В є ступінь забруднення ґрунту ^{137}Cs , ^{90}Sr та ізотопами плутонію. Тому, крім GM і GSD , важливо знати можливі верхні межі цього забруднення із заданим ступенем (імовірністю) довіри P . На основі вищевикладеного їх можна обчислити як $A_p = GM \cdot GSD^{U_p}$, де U_p - квантиль розподілу Гаусса. У даній роботі $P = 90\%$. Це означає, що щільність забруднення 90% площі угіддя не буде перевершувати величини A_p .

При господарській характеристиці сільськогосподарського угіддя (рілля, сінокіс, випас) будемо виходити з того факту, що воно є засобом виробництва рослинницької продукції. У віддалений період після аварії ступінь забруднення радіонуклідами продукції (продуктів харчування, кормів) повністю визначається забрудненням ними ґрунту сільськогосподарського угіддя. Весь урожай рослинницької продукції, яку отримали на одному угідді, як правило, змішується, і вміст радіонуклідів у ньому є випадковою величиною, що описується відповідним законом розподілу ймовірностей (1) [6, 15]. Для прогнозування вмісту радіонуклідів в урожаї будемо використовувати співвідношення

$$C_{\text{roc}} = КП \cdot A, \quad (3)$$

де C_{roc} – питома активність радіонукліда в рослинах, Бк/кг; A – щільність забруднення ґрунту радіонуклідом, кБк/м²; $КП$ – коефіцієнт переходу радіонукліда з ґрунту в господарську цінну частину продукції рослинництва. Оскільки A і $КП$ логнормально розподілені випадкові величини, то і C_{roc} також буде випадковою величиною з логнормальним законом розподілу ймовірностей, для якого відповідні середні геометричні (медіани) GM_{roc} і стандартні геометричні відхилення GSD_{roc} обчислюються як

$$GM_{\text{roc}} = GM_{\text{КП}} \cdot GM_A, \\ GSD_{\text{roc}} = \exp\left(\sqrt{\ln^2(GSD_{\text{КП}}) + \ln^2(GSD_A)}\right), \quad (4)$$

де $GSD_{\text{КП}}$ у разі відсутності даних відповідно до [3, 6] будемо приймати рівним 1,63. Ці характеристики, як і в разі забруднення ґрунту радіонуклідами, дозволяють оцінити можливі верхні межі вмісту радіонуклідів в урожаї рослин із заданим ступенем (імовірністю) довіри P :

$$C_{\text{roc}}^P = GM_{\text{roc}} \cdot (GSD_{\text{roc}})^{U_p}. \quad (5)$$

Це означає, що в 90% випадків вміст радіонуклідів у пробах урожаю не буде перевищувати величини C_{roc}^P .

Вміст ^{137}Cs та ^{90}Sr в харчових продуктах та продукції сільського господарства регламентується вимогами [2]. Він не повинен перевищувати встановлених відповідних значень $C_{^{137}\text{Cs}}^0$ і $C_{^{90}\text{Sr}}^0$ та також задовольняти співвідношення $d = ^{137}\text{Cs} / C_{^{137}\text{Cs}}^0 + ^{90}\text{Sr} / C_{^{90}\text{Sr}}^0 < 1$. Знання законів розподілу вмісту радіонуклідів ^{137}Cs і ^{90}Sr у врожаї рослин дає змогу оцінити ризики (імовірності) перевищення q цього вмісту відповідно до встановлених нормативів як для кожного радіонукліда

$$q = \Phi\left(\frac{\ln(C_{\text{roc}}) - \ln(GM_{\text{roc}})}{\ln(GSD_{\text{roc}})}\right), \quad (6)$$

так і за сукупністю

$$q_{\Sigma} = \text{Ver}\left\{\left(\frac{^{137}\text{Cs}}{C_{^{137}\text{Cs}}^0} + \frac{^{90}\text{Sr}}{C_{^{90}\text{Sr}}^0}\right) \geq 1\right\}. \quad (7)$$

де $\Phi(\dots)$ – функція розподілу Гаусса.

3. Результати та обговорення

У 2020 р. в південно-східній частині Народицького району Житомирської області в околицях сіл Осика, Межиліска та Базар здійснено радіологічне обстеження сільськогосподарських угідь, які відповідно до [1] раніше були виведені із сільськогосподарського використання. Усього на даній території було обстежено близько 500 га таких земель.

Незважаючи на статус цих угідь, на них періодично здійснюється господарська діяльність, пов'язана з вирощуванням сільськогосподарських культур. Згідно з кадастровою картою [16], землі запасу, що перебувають у державній власності та з невизначеним типом власності, становлять близько 85% (≈ 425 га), мають статус цільового призначення «Для ведення товарного сільськогосподарського виробництва» та знаходяться у приватній $\approx 10\%$ (≈ 50 га) і комунальній власності $\approx 5\%$ (≈ 25 га) від площі обстежених угідь.

На цих угіддях за допомогою радіометра-дозиметра РКС-01 «СТОРА-ТУ» вимірювалося значення ПАЕД в 700 - 1000 точках залежно від площі угіддя. Паралельно відбиралося від 3 до 16 проб ґрунту, в яких вимірювався вміст ^{137}Cs і ^{90}Sr . За результатами прямих і непрямих вимірювань були оцінені характеристики щільності забруднення ґрунту (медіана, геометричне стандартне відхилення, верхня межа для $P = 0,9$) обстежених полів радіонуклідами ^{137}Cs , ^{90}Sr та ізотопами плутонію (табл. 1, рис. 1).

Таблиця 1. Характеристики радіоактивного забруднення виведених із сільськогосподарського використання угідь в околицях сіл Осика, Межиліска, Базар на 2020 р.

№ поля	^{137}Cs			^{90}Sr			Ізотопи плутонію		
	$GM, \text{кБк/м}^2$	GSD	$A_{0,9}, \text{кБк/м}^2$	$GM, \text{кБк/м}^2$	GSD	$A_{0,9}, \text{кБк/м}^2$	$GM, \text{кБк/м}^2$	GSD	$A_{0,9}, \text{кБк/м}^2$
1	127,0	1,45	204,4	0,89	1,37	1,36	0,040	1,67	0,078
2	153,4	1,63	286,7	0,84	1,37	1,27	0,038	1,66	0,073
3	300,3	1,77	623,7	1,39	1,79	2,88	0,063	2,03	0,156
4	198,1	1,86	438,4	1,70	1,44	2,71	0,077	1,72	0,155
5	133,2	1,66	254,8	1,81	1,39	2,76	0,082	1,68	0,160
6	186,8	1,65	354,6	2,08	1,43	3,33	0,095	1,71	0,188
7	200,3	1,66	383,2	1,46	1,39	2,27	0,066	1,68	0,129
8	206,4	1,61	379,7	0,99	1,43	1,54	0,045	1,71	0,090
9	265,0	1,59	479,8	1,61	1,38	2,42	0,073	1,67	0,141

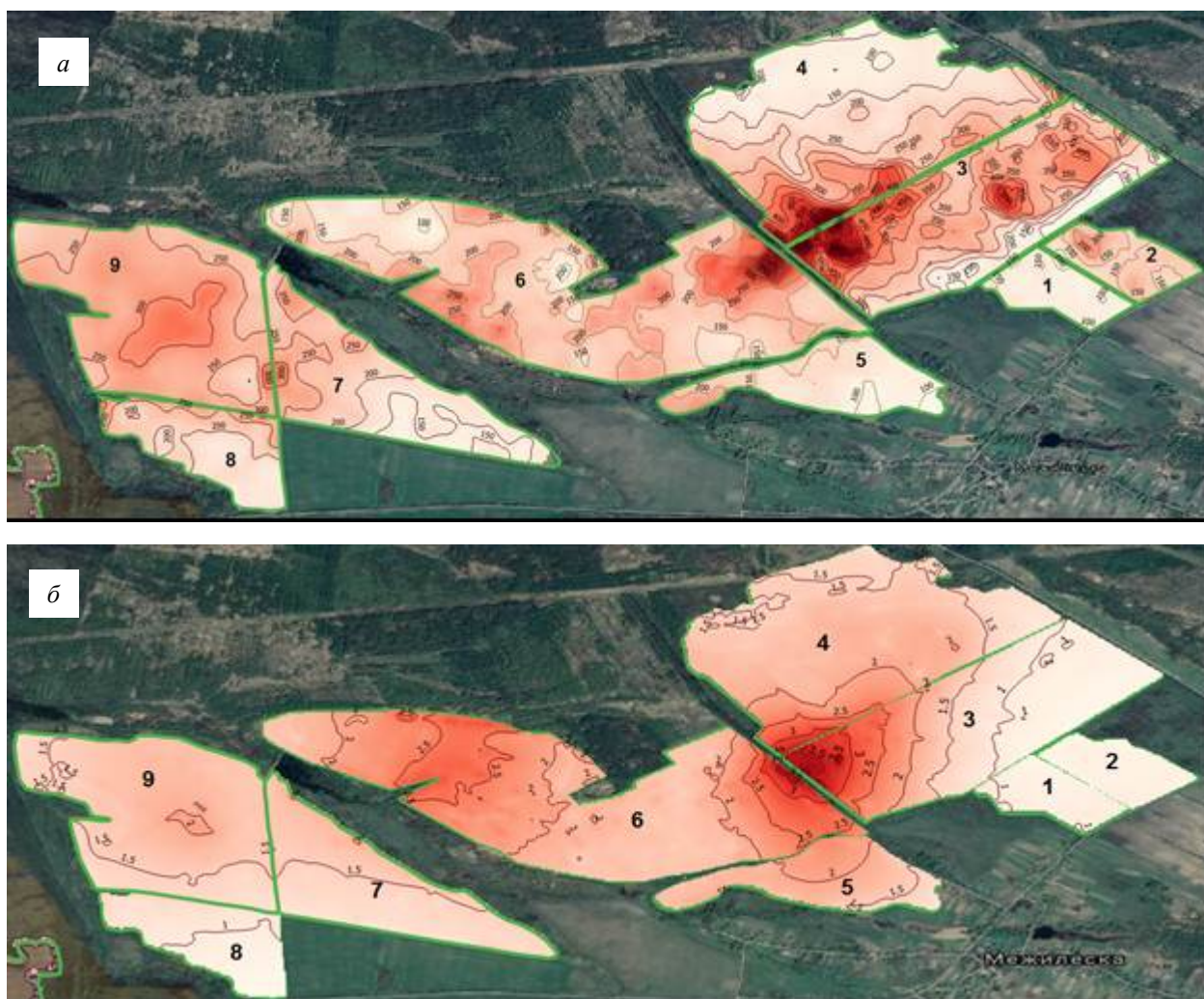


Рис. 1. Забруднення ^{137}Cs (а) і ^{90}Sr (б) виведених з використання сільськогосподарських угідь в околицях сіл Осика, Межиліска, Базар станом на 2020 р., кБк/м².
(Див. кольоровий рисунок на сайті журналу.)

Переважаючими ґрунтами на обстежених полях є дерново-середньо- і сильнопідзолисті глейові супіщані і суглинкові ґрунти та дерново-середньо- і сильнопідзолисті поверхнево-оглесні ґрунти [16]. Для прогнозування забруднення врожаю на обстежених полях радіонуклідами ^{137}Cs та ^{90}Sr було обрано тестові культури (табл. 2), що є характерними на даний час для

регіону здійснення досліджень та посіви яких згідно з даними супутникового моніторингу [17] є домінуючими у структурі посівних площ Житомирської області та Народицького району. У таблиці наведено статистичні характеристики коефіцієнтів переходу радіонуклідів для тестових культур на дерново-підзолистих ґрунтах та допустимі рівні питомої активності ^{137}Cs і ^{90}Sr у

сільськогосподарській продукції [2, 18]. Представлені значення коефіцієнтів переходу розраховано (наведено) для бульб картоплі на сиру масу, продукції інших культур на суху масу.

Вміст ізотопів плутонію у харчових продуктах та продукції сільського господарства вимогами нормативів [2, 18, 19] не регламентується.

Таблиця 2. Коефіцієнти накопичення радіонуклідів для тестових сільськогосподарських культур [20 - 34] та допустимі рівні питомої активності у продукції ¹³⁷Cs і ⁹⁰Sr

№ поля	Культура	¹³⁷ Cs			⁹⁰ Sr		
		GM _{КП} , (Бк/кг)/(кБк/м ²)	GSD _{КП}	C ⁰ _{¹³⁷Cs} , Бк/кг	GM _{КП} , (Бк/кг)/(кБк/м ²)	GSD _{КП}	C ⁰ _{⁹⁰Sr} , Бк/кг
1	Картопля (бульби) (<i>Solanum tuberosum</i> L.)	0,047	1,83	60	0,23	1,56	20
2	Соя (боби) (<i>Glycine max</i> (L.) Merr.)	0,067**	1,8**	50	1,05**	2,7**	30
3	Ріпак (насіння) (<i>Brassica napus</i> L.)	0,19	2,39	70	4,06	1,67	10
4	Соняшник (насіння) (<i>Helianthus annuus</i> L.)	0,18**(n = 1)	1,63***	70	0,37**(n = 1)	1,63***	10
	Зернові культури (зерно):	0,065	1,68	50	0,69	2,7	20
5	Жито (<i>Secale cereale</i> L.)	0,024	1,98	50	0,47*	2,5*	20
6	Пшениця (<i>Triticum</i> L.)	0,054	1,73	50	0,37*	2,4*	20
7	Овес (<i>Avena sativa</i> L.)	0,065	1,68	50	0,69*	2,7*	20
8	Просо (<i>Panicum miliaceum</i> L.)	0,052	1,57	50	0,54	1,47	20
9	Кукурудза (зерно) (<i>Zea mays</i> L.)	0,017**	1,9**	50	0,029**	1,8**	20

* Дані роботи [34].

** Дані УкрНДІСГР.

*** Прийнято відповідно до результатів [3, 6].

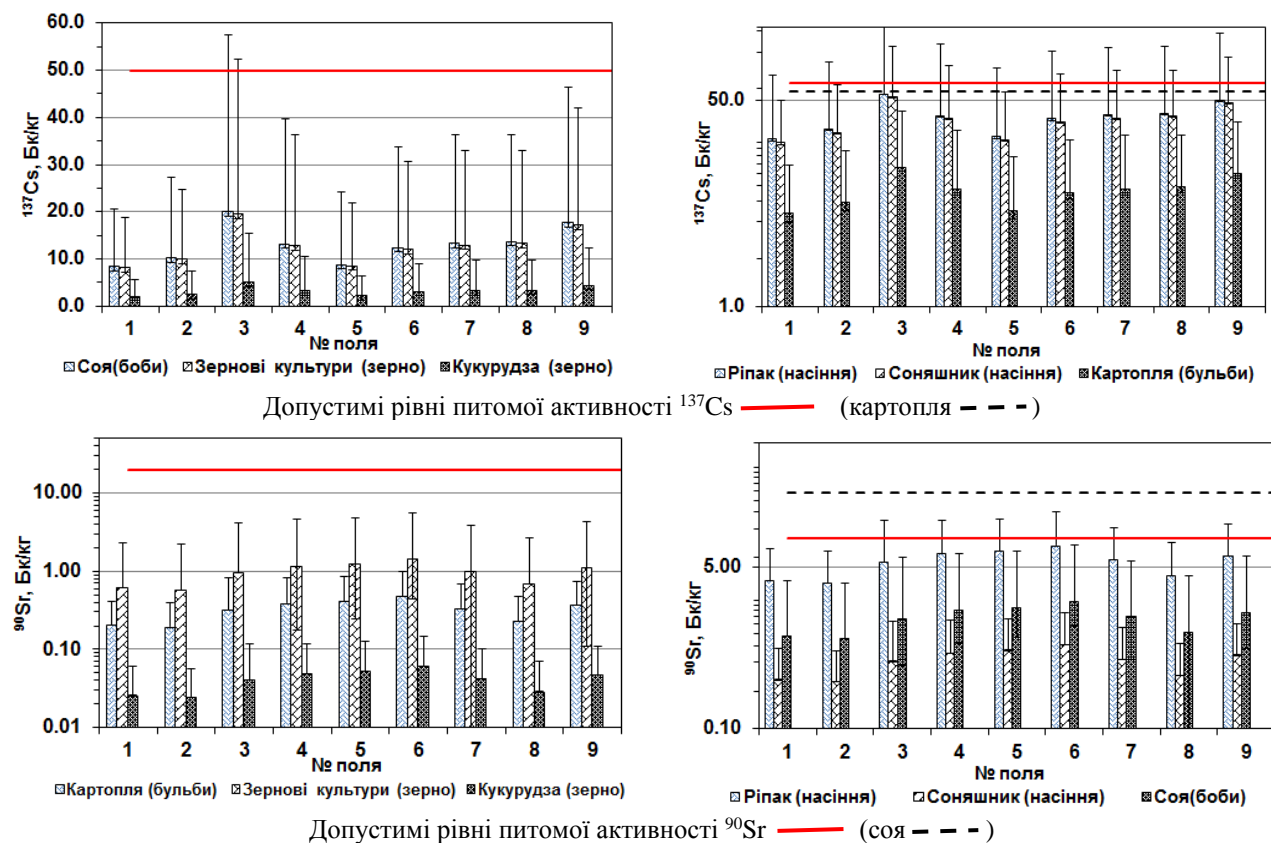


Рис. 2. Прогнозований вміст радіонуклідів у врожаї тестових культур на 2020 р. без застосування контрзаходів.

На основі підходу, викладеного в розділі 2, та співвідношень (4) і (5) було оцінено характеристики забруднення врожаю тестових рослин (медіана, геометричне стандартне відхилення, верхня межа для $P = 0,9$) радіонуклідами ^{137}Cs і ^{90}Sr на обстежених угіддях. Результати розрахунків, наведені на рис. 2, показують, що для обстежених угідь радіологічно критичним є забруднення ґрунту ^{137}Cs . Без застосування контрзаходів вміст ^{137}Cs в урожаї окремих сільськогосподарських культур (наприклад, соя, ріпак, соняшник) може перевищувати встановлені нормативи. Вміст ^{90}Sr в урожаї всіх розглянутих сільськогосподарських культур не перевищує встановлених нормативів. Використовуючи співвідношення (6) і (7) для

врожаю тестових сільськогосподарських культур, було оцінено ризики перевищення вмісту радіонуклідів у господарській цінній частині врожаю ^{137}Cs і ^{90}Sr q і q_{Σ} (рис. 3) згідно з установленними (діючими) нормативами [2].

У групі зернових культур було розглянуто жито, пшеницю, овес, просо. Серед них найбільш критичною культурою в радіологічному відношенні є овес. Тому прогнозування (ризиків перевищення) вмісту ^{137}Cs і ^{90}Sr у врожаї зернових виконано на основі коефіцієнтів переходу для вівса. Оцінку можливого вмісту радіонуклідів у зерні кукурудзи, як домінуючої культури у структурі посівних площ регіону досліджень, було здійснено окремо.

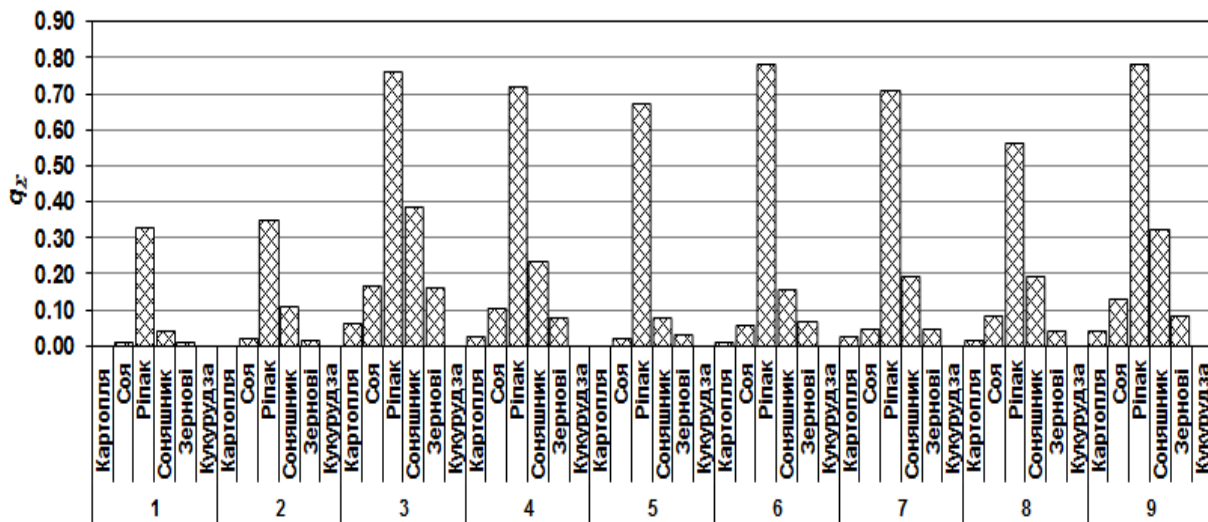


Рис. 3. Ризики перевищення встановлених нормативів ^{137}Cs і ^{90}Sr в продукції сільського господарства

$$q_{\Sigma} = \text{Ver} \left\{ \left(\frac{^{137}\text{Cs}}{C_{^{137}\text{Cs}}^0} + \frac{^{90}\text{Sr}}{C_{^{90}\text{Sr}}^0} \right) \geq 1 \right\} \text{ на 2020 р. без застосування контрзаходів.}$$

4. Висновок

За результатами радіологічного обстеження орних сільськогосподарських угідь Народицького району Житомирської області, які відповідно до Закону України «Про правовий режим території, що зазнала радіоактивного забруднення внаслідок Чорнобильської катастрофи» раніше були виведені із сільськогосподарського використання, проведеного УкрНДІСГР у 2020 р., нами отримано такі результати:

За сукупністю вимірювань ПАЕД, прямих вимірювань вмісту ^{137}Cs і ^{90}Sr у ґрунті побудовано карти щільності забруднення ґрунту ^{137}Cs і ^{90}Sr цих угідь.

Оцінено статистичні характеристики щільності забруднення ґрунту цих угідь (медіана, геометричне стандартне відхилення, верхня межа для $P = 0,9$) радіонуклідами ^{137}Cs , ^{90}Sr та ізотопами плутонію.

На основі статистичного моделювання для обстежених угідь оцінено можливий вміст радіонуклідів ^{137}Cs , ^{90}Sr (медіана, геометричне стандартне відхилення, верхня межа для $P = 0,9$) в урожаї характерних для Народицького району сільськогосподарських культур та ризики їх перевищення встановлених нормативів в урожаї.

Обстежені угіддя в даний час можуть бути віднесені до 3-ї зони радіоактивного забруднення, а частина площ полів до зони посиленого радіоекологічного контролю, на якій не заборонено ведення господарської діяльності (за виключенням частини полів № 3 та № 4 через наявність локальних «плям» із рівнями забруднення ґрунту ^{137}Cs більше 550 - 600 кБк/м²).

Отримані результати можуть бути використані в якості основи при прийнятті рішень щодо радіологічної реабілітації, зміни їхнього статусу та повернення угідь у господарське використання.

4. Рекомендації

Ґрунтуючись на отриманих оцінках прогнозованого вмісту радіонуклідів у врожаї тестових культур та ризиків перевищення вмісту радіонуклідів ^{137}Cs і ^{90}Sr встановлених нормативів, за умови відсутності контрзаходів, рекомендується на обстежених полях не вирощувати ріпак на насіння та обмежити посіви соняшнику та сої як найбільш критичних культур, для яких існує достатньо висока ймовірність отримання врожаю з перевищенням вимог ДР-2006 (ріпак – $q_{\Sigma} = 30 - 80 \%$; соняшник – $q_{\Sigma} = 5 - 40 \%$; соя, зернові на полях № 3 і № 4 – $q_{\Sigma} = 8 - 17 \%$). У випадку виключення із землекористування локальної «плями» радіоактивного забруднення рекомендованими для вирощування з переліку тестових культур на обстежених полях (у порядку збільшення ризику отримання продукції з перевищенням вмісту ^{137}Cs і ^{90}Sr) є кукурудза, карто-

пля і зернові культури – жито, пшениця, просо, овес.

Для поліпшення радіологічної ситуації та зниження ризику перевищення вмісту допустимих рівнів радіонуклідів у товарній продукції (мінімізації вмісту радіонуклідів у товарній продукції) на даних угіддях доцільним є застосування комплексу агрохімічних та організаційних заходів (контрзаходів), направлених на зниження надходження радіонуклідів у культури: організація землекористування з урахуванням щільності забруднення ґрунту радіонуклідами; підбір культур за їхніми біологічними властивостями щодо накопичення радіонуклідів; застосування агрохімічних заходів (вапнування, оптимізовані системи удобрення сільськогосподарських культур зі співвідношенням азоту, фосфору та калію на рівні 1 : 1,5 : 2), що потенційно дасть змогу знизити рівень забруднення продукції ^{137}Cs і ^{90}Sr у 1,5 - 3 (2) рази.

СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ

1. Закон України «Про правовий режим території, що зазнала радіоактивного забруднення внаслідок Чорнобильської катастрофи» від 27.02.91 р. № 791а-ХІІ. *Відомості Верховної Ради УРСР* 16 (1991) ст. 198.
2. Державні гігієнічні нормативи. Допустимі рівні вмісту радіонуклідів ^{137}Cs та ^{90}Sr у продуктах харчування та питній воді. Гігієнічний норматив ГН 6.6.1.1-130-2006. *Офіційний вісник України* 29 (2006) 142.
3. Ю.В. Хомутинин, В.А. Кашпаров, Е.И. Жебровская. *Оптимизация отбора и измерений проб при радиоэкологическом мониторинге* (К.: ВПОЛ, 2001). 160 с.
4. Ю.В. Хомутинин. Оптимизация пробоотбора при оценке плотности радиоактивных выпадений. *Ядерная физика та енергетика* 1(9) (2003) 145.
5. Ю.В. Хомутинин, С.Є. Левчук, В.В. Павлюченко. Оптимізація відбору проб ґрунту при картуванні щільності радіоактивних випадань. *Вісник Житомир. ун-ту* 3(1)(55) (2016) 74.
6. Ю.В. Хомутинин. Статистические характеристики коэффициентов перехода радионуклидов из почвы в растения и минимально необходимое число сопряженных проб для их достоверной оценки. *Ядерная физика та енергетика* 3(11) (2003) 95.
7. Ю.В. Хомутинин и др. Прогнозирование содержания ^{129}I в луговом разнотравье пастбищ Коростенского и Народичевского районов. *Ядерная физика та енергетика* 18(4) (2017) 361.
8. Ю.В. Хомутинин и др. Картографирование радиоактивного загрязнения территории с пятнистой структурой. *Проблеми Чорнобильської зони відчуження* 19 (2018) 58.
9. Ю.В. Хомутинин та ін. Картографування забруднених радіонуклідами сільськогосподарських угідь для повернення їх в господарське використання. *Ядерна фізика та енергетика* 20(3) (2019) 285.
10. Ю.В. Хомутинин та ін. Картографування радіоактивного забруднення з заданим рівнем довіри. *Ядерна фізика та енергетика* 21(3) (2020) 265.
11. Ю.В. Хомутинин, С.Є. Левчук, В.В. Павлюченко. Методологія оперативної оцінки радіоактивного забруднення земель сільськогосподарського призначення з метою повернення їх у господарське використання. *Ядерна фізика та енергетика* 22(1) (2021) 74.
12. V.A. Kashparov et al. Soil contamination with ^{90}Sr in the near zone of the Chernobyl accident. *Journal of Environment Radioactivity* 56(3) (2001) 285.
13. V.A. Kashparov et al. Territory contamination with the radionuclides representing the fuel component of Chernobyl fallout. *Science of the Total Environment* 317(1-3) (2003) 105.
14. T. Hengl, G. Heuvelink, D. Rossiter. About regression-kriging: From equations to case studies. *Computers & Geosciences* 33 (2007) 1301.
15. U. Barnekow et al. Guidelines on Soil and Vegetation Sampling for Radiological Monitoring. IAEA, Technical Reports Series 486 (2019) 266 p.
16. Публічна кадастрова карта України.
17. EOS Crop Monitoring.
18. Recommendations on establishing of regulatory limits on the radioactive contamination of foodstuffs, agricultural and forestry products (Vienna, 2015) 136 p.

19. ДСТУ 4674:2006 Сіно. Технічні умови (К.: Держспоживстандарт України, 2008) 20 с.
20. О.В. Лопатюк. Оцінка екологічних та соціально-економічних умов проживання сільського населення Полісся України у віддалений період після аварії на ЧАЕС. Дис. канд. с.-г. наук (Житомир, 2020) 226 с.
21. М.І. Дідух, В.П. Славов. Особливості радіоактивного забруднення агроecosystem Полісся України у віддалений період після аварії на ЧАЕС. *Агроекологічний журнал* 1 (2016) 51.
22. Н.Н. Цыбулько. Временная динамика параметров миграции ^{137}Cs и ^{90}Sr в системе почва-растение: сравнительный анализ. *Почвовед. и агрохим* 2(55) (2015) 92.
23. Н.О. Кимаковська. Радіоекологічне обґрунтування допустимих рівнів забруднення ґрунту ^{137}Cs для ведення підсобного господарства на радіоактивно забруднених територіях у віддалений період. Дис. канд. с.-г. наук (Житомир, 2015) 158 с.
24. Ю.В. Путятин, Т.М. Серая, А.И. Соколик. Влияние калийного питания и кислотности дерново-подзолистой супесчаной почвы на урожай и накопление ^{137}Cs и ^{90}Sr яровым рапсом и картофелем. *Весті Нацыянальнай акадэміі навук Беларусі. Серыя аграрных навук* 3 (2006) 47.
25. Ю.В. Путятин, Т.М. Серая, И.А. Добровольская. Влияние калийных удобрений и кислотности дерново-подзолистой супесчаной почвы на урожайность и накопление ^{137}Cs и ^{90}Sr зерновыми культурами. *Агрохимия* 7 (2005) 59.
26. Рекомендации по ведению сельскохозяйственного производства в условиях радиоактивного загрязнения земель Республики Беларусь на 2012 - 2016 годы (Минск, 2012) 124 с.
27. О.М. Таврыкина, В.А. Довнар. Вынос радионуклидов ^{137}Cs и ^{90}Sr из дерново-подзолистой супесчаной почвы различными сортами овса. *Почвовед. и агрохим.* 2(47) (2011) 130.
28. Э.М. Бартышаев, И.М. Богдевич. Урожайность и накопление ^{137}Cs и ^{90}Sr в зерне различных сортов проса на дерново-подзолистой супесчаной почве. *Почвовед. и агрохим.* 1(46) (2011) 168.
29. И.М. Богдевич и др. Рекомендации по возделыванию проса на продовольственные цели на дерново-подзолистых супесчаных почвах в условиях радиоактивного загрязнения (Минск: Ин-т почвоведения и агрохимии, 2011) 33 с.
30. О.М. Таврыкина, И.М. Богдевич, Ю.В. Путятин. Вынос радионуклида ^{90}Sr сортами озимой и яровой пшеницы, возделываемой на загрязненной радионуклидами дерново-подзолистой супесчаной почве. *Почвовед. и агрохим.* 1(46) (2011) 115.
31. Э.М. Батыршаев. Влияние видов и доз азотных удобрений на урожайность и накопление ^{137}Cs и ^{90}Sr зерном проса. В кн.: Плодородие почв и эффективное применение удобрений. Материалы междунар. науч.-практ. конф. Минск, 5 - 8 июля 2011 г. (Минск: Ин-т почвоведения и агрохимии, 2011) с. 194.
32. Г.В. Седукова, С.А. Исаченко. Параметры накопления и предельные плотности загрязнения почв радионуклидами для производства нормативно чистой продукции озимого рапса на территории радиоактивного загрязнения. *Земледелие и селекция в Беларуси* 54 (2018) 180.
33. Г.В. Седукова, С.А. Исаченко. Влияние агрохимических показателей на параметры перехода и предельные плотности загрязнения почв радионуклидами для производства нормативно чистой продукции озимого рапса. *Земледелие и селекция в Беларуси* 55 (2019) 151.
34. I. Labunska et al. Current radiological situation in areas of Ukraine contaminated by the Chernobyl accident. Part 2. Strontium-90 transfer to culinary grains and forest woods from soils of Ivankiv district. *Environment International* 146 (2021) 106282.

**Yu. V. Khomutinin*, M. A. Zhurba, S. E. Levchuk,
O. V. Kosarchuk, S. V. Polishchuk, V. V. Pavliuchenko**

*Ukrainian Institute of Agricultural Radiology
of the National University of Life and Environmental Sciences of Ukraine, Kyiv, Ukraine*

*Corresponding author: khomutinin@gmail.com

FORECASTING OF ^{137}Cs AND ^{90}Sr RADIONUCLIDES INTAKE INTO AGRICULTURAL CROPS

Maps of the ^{137}Cs contamination of abandoned agricultural land in Narodychi district (Zhytomyr region) were built using data of the radiological survey. Statistical characteristics of the soil contamination with ^{137}Cs , ^{90}Sr , and plutonium isotopes (median, geometric standard deviation, upper limit for $P = 0.9$) were estimated. Contamination of the local crops with ^{137}Cs and ^{90}Sr as well as the risk of exceeding permissible levels were estimated. Recommendations for the return of these lands for commercial use are provided.

Keywords: contamination of land with ^{137}Cs and ^{90}Sr , mapping, forecasting of ^{137}Cs and ^{90}Sr uptake.

REFERENCES

1. Law of Ukraine "On the Legal Regime of the Territory Suffered from Radioactive Contamination as a Result of the Chernobyl Accident" of February 27, 1991, No. 791a-XII. *Vidomosti Verkhovnoyi Rady URSR 16 (1991) Art. 198.* (Ukr)
2. State hygienic standards. Permissible levels of ^{137}Cs and ^{90}Sr radionuclides in food and drinking water. Hygienic standard. ГН 6.6.1.1-130-2006. *Ofitsiynny visnyk Ukrayiny 29 (2006) 142.* (Ukr)
3. Yu.V. Khomutinin, V.A. Kashparov, E.I. Zhebrovskaya. *Optimization of Sampling and Measurements of Samples during Radioecological Monitoring* (Kyiv: VIPOL, 2001) 160 p. (Rus)
4. Yu.V. Khomutinin. Optimization of sampling for assessment of contamination density by local territory radionuclides. *Yaderna Fizyka ta Energetyka (Nucl. Phys. At. Energy) 1(9) (2003) 145.* (Rus)
5. Yu.V. Khomutinin, S.E. Levchuk, V.V. Pavlyuchenko. Optimization of soil sampling in the mapping of radioactive fallout density. *Visnyk Zhytomyrskoho Universytetu 3 (1) (55) (2016) 74.* (Ukr)
6. Yu.V. Khomutinin. Statistical characteristics of radionuclides soil-to-plant transfer factors and minimal necessary amount of the coupled samples for their reliable estimation. *Yaderna Fizyka ta Energetyka (Nucl. Phys. At. Energy) 3(11) (2003) 95.* (Rus)
7. Yu.V. Khomutinin et al. ^{129}I content forecasting in the meadow motley grass of Korosten and Narodichi districts pastures. *Yaderna Fizyka ta Energetyka (Nucl. Phys. At. Energy) 18(4) (2017) 361.* (Rus)
8. Yu.V. Khomutinin et al. Mapping of radioactive contamination of the territory with spotted structure. *Problemy Chernobylskoyi zony vidchuzhennya (Problems of Chernobyl Exclusion Zone) 19 (2018) 58.* (Rus)
9. Yu.V. Khomutinin et al. Mapping of radionuclide-contaminated agricultural land to make them available for use. *Yaderna Fizyka ta Energetyka (Nucl. Phys. At. Energy) 20(3) (2019) 285* (Ukr)
10. Yu.V. Khomutinin et al. Mapping of radioactive contamination with predetermined confidence level. *Yaderna Fizyka ta Energetyka (Nucl. Phys. At. Energy) 21(3) (2020) 265.* (Ukr)
11. Yu.V. Khomutinin, S.E. Levchuk, V.V. Pavlyuchenko. Operative assessment of radioactive contamination of agricultural land for their return to use. *Yaderna Fizyka ta Energetyka (Nucl. Phys. At. Energy) 22(1) (2021) 74.* (Ukr)
12. V.A. Kashparov et al. Soil contamination with ^{90}Sr in the near zone of the Chernobyl accident. *Journal of Environment Radioactivity 56(3) (2001) 285.*
13. V.A. Kashparov et al. Territory contamination with the radionuclides representing the fuel component of Chernobyl fallout. *Science of the Total Environment 317(1-3) (2003) 105.*
14. T. Hengl, G. Heuvelink, D. Rossiter. About regression-kriging: From equations to case studies. *Computers & Geosciences 33 (2007) 1301.*
15. U. Barnekow et al. *Guidelines on Soil and Vegetation Sampling for Radiological Monitoring.* IAEA, Technical Reports Series 486 (2019) 266 p.
16. *Public cadastral map of Ukraine.* (Ukr)
17. *EOS Crop Monitoring.*
18. *Recommendations on establishing of regulatory limits on the radioactive contamination of food-stuffs, agricultural and forestry products* (Vienna, 2015) 136 p.
19. State Standard of Ukraine 4674: 2006 Hay. Technical conditions (Kyiv: Derzhspozhyvstandart of Ukraine, 2008) 20 p. (Ukr)
20. O.V. Lopatyuk. *Assessment of ecological and socio-economic living conditions of the rural population of Polissya of Ukraine in the remote period after the Chernobyl accident.* Thesis of Candidate of agricultural Sciences (Zhytomyr, 2020) 226 p. (Ukr)
21. M.I. Didukh, V.P. Slavov. Features of radioactive contamination of agro-ecosystems of Polissya of Ukraine in the remote period after the Chernobyl accident. *Ahroekolohichnyy Zhurnal 1 (2016) 51.* (Ukr)
22. N.N. Tsybulko. Time dynamics of ^{137}Cs and ^{90}Sr migration parameters in the soil-plant system: a comparative analysis. *Pochvovedeniye i Agrokhimiya 2(55) (2015) 92.* (Rus)
23. N.O. Kymakovska. *Radioecological substantiation of permissible levels of ^{137}Cs soil contamination for subsistence farming in radioactively contaminated areas in the remote period.* Thesis of Candidate of agricultural Sciences (Zhytomyr, 2015) 158 p. (Ukr)
24. Yu.V. Putyatin, T.M. Seraya, A.I. Sokolik. Influence of potassium nutrition and acidity of soddy-podzolic sandy loamy soil on the yield and accumulation of ^{137}Cs and ^{90}Sr in spring rapeseed and potatoes. *Viesci Nacyjanal'noj Akademii Navuk Bielarusi. Sieryja Ahrarnych Navuk 3 (2006) 47.* (Rus)
25. Yu.V. Putyatin, T.M. Seraya, I.A. Dobrovolskaya. Influence of potash fertilizers and acidity of sod-podzolic sandy loamy soil on the yield and accumulation of ^{137}Cs and ^{90}Sr in grain crops. *Agrokhimiya 7 (2005) 59.* (Rus)
26. *Recommendations for agricultural production in the conditions of radioactive contamination of the lands of the Republic of Belarus for 2012 - 2016* (Minsk, 2012) 124 p. (Rus)
27. O.M. Tavrykina, V.A. Dovnar. Removal of ^{137}Cs and ^{90}Sr radionuclides from soddy-podzolic sandy loamy soil by various varieties of oats. *Pochvovedeniye i Agrokhimiya 2(47) (2011) 130.* (Rus)

28. E.M. Bartyshaev, I.M. Bogdevich. Yield and accumulation of ^{137}Cs and ^{90}Sr in grains of different varieties of millet on soddy-podzolic sandy loamy soil. *Pochvovedeniye i Agrokimiya* 1(46) (2011) 168. (Rus)
29. I.M. Bogdevich et al. Recommendations for the cultivation of millet for food purposes on soddy-podzolic sandy loamy soils under conditions of radioactive contamination (Minsk: Institute of Soil Science and Agrochemistry, 2011) 33 p. (Rus)
30. O.M. Tavrykina, I.M. Bogdevich, Yu.V. Putyatin. Removal of ^{90}Sr radionuclide by varieties of winter and spring wheat cultivated on soddy-podzolic sandy loam soil contaminated with radionuclides. *Pochvovedeniye i Agrokimiya* 1(46) (2011) 115. (Rus)
31. E.M. Bartyshaev. Influence of types and doses of nitrogen fertilizers on the yield and accumulation of ^{137}Cs and ^{90}Sr in millet grain. In: Soil Fertility and Efficient use of Fertilizers. Materials of the Int. Sci-Pract. Conf. Minsk, July 5 - 8, 2011 (Minsk: Institute of Soil Science and Agrochemistry, 2011) p. 194. (Rus)
32. G.V. Sedukova, S.A. Isachenko. Parameters of accumulation and limiting densities of soil contamination with radionuclides to produce normatively clean products of winter rapeseed in the territory of radioactive contamination. *Zemledeliye i Seleksiya v Belarusi* 54 (2018) 180. (Rus)
33. G.V. Sedukova, S.A. Isachenko. Influence of agrochemical parameters on the transition parameters and limiting densities of soil contamination with radionuclides to produce normatively pure winter rapeseed products. *Zemledeliye i Seleksiya v Belarusi* 55 (2019) 151. (Rus)
34. I. Labunska et al. Current radiological situation in areas of Ukraine contaminated by the Chernobyl accident. Part 2. Strontium-90 transfer to culinary grains and forest woods from soils of Ivankiv district. *Environment International* 146 (2021) 106282.

Надійшла/Received 15.04.2021