

Ю. В. Хомути́нін\*, О. В. Косарчук, С. В. Поліщук

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

\*Відповідальний автор: khomutinin@gmail.com

**ПОБУДОВА КАРТОСХЕМ ЩІЛЬНОСТІ ЗАБРУДНЕННЯ  $^{137}\text{Cs}$   
СІЛЬСЬКОГОСПОДАРСЬКИХ УГІДЬ ЗА СУКУПНІСТЮ РЕЗУЛЬТАТІВ ОБСТЕЖЕННЯ**

Запропоновано і апробовано методологію побудови картосхем щільності забруднення  $^{137}\text{Cs}$  сільськогосподарських угідь за сукупністю вимірювань потужності експозиційної дози, потужності амбієнтного еквівалента дози за результатами гамма-каротажу та безпосереднього визначення значень щільності забруднення  $^{137}\text{Cs}$  на основі відбору проб ґрунту, що отримані різними організаціями у 1988 - 2021 рр. Методологія дає змогу узагальнювати всю наявну інформацію про щільність забруднення ґрунту  $^{137}\text{Cs}$  для угідь, які розглядаються, що істотно поліпшує репрезентативність оцінок щільності забруднення угідь  $^{137}\text{Cs}$ .

*Ключові слова:* картографування, щільність забруднення угідь  $^{137}\text{Cs}$ , потужність дози.

**1. Вступ**

Повернення до господарського використання виведених із сівозмін після Чорнобильської аварії сільськогосподарських угідь вимагає детальних карт або картосхем щільності їхнього забруднення радіонуклідами, в першу чергу  $^{137}\text{Cs}$  і  $^{90}\text{Sr}$ . Побудова їх ґрунтується на результатах радіологічного моніторингу в цілому та окремих радіологічних обстежень конкретних територій. Інформація про щільність забруднення ґрунту  $^{137}\text{Cs}$  (далі –  $A_{Cs}$ ,  $\text{кБк}/\text{м}^2$ ), як правило, представлена двома типами даних: прямі вимірювання щільності забруднення ґрунту, що базуються на відбиранні проб ґрунту і вимірюванні в них вмісту радіонуклідів у лабораторії [1, 2]; непрямі вимірювання, оцінки щільності забруднення ґрунту на основі вимірювання потужності експозиційної дози (ПЕД) [3, 4] або потужності амбієнтного еквівалента дози (ПАЕД) [5 - 7] чи на результатах гамма-каротажу [8]. Використання цих результатів для побудови картосхем  $A_{Cs}$  вимагає прив'язки їх до координат місцевості (координат точок вимірювання або картосхеми з нанесеними на ній точками вимірювання). Картосхеми  $A_{Cs}$  побудовані на основі даних щодо концентрації активності цього радіонукліда у відібраних пробах ґрунту найбільш достовірні. Однак детальні картосхеми  $A_{Cs}$  вимагають відбору великої кількості проб ґрунту (тим більше, чим більша площа угіддя) і вимірювання в них вмісту радіонуклідів [9]. Це потребує значних матеріальних витрат та часу.

Результати вимірювання потужності дози (ПЕД, ПАЕД тощо) корелюють зі щільністю

забруднення ґрунту  $^{137}\text{Cs}$  [4 - 7]. За цими результатами за допомогою різних методів з деякою похибкою можна оцінити величину  $A_{Cs}$ . Однак картосхеми значень  $A_{Cs}$ , що побудовані за такими даними, буде менш достовірною. Проте ці дані можуть бути апріорною інформацією при побудові картосхеми величини  $A_{Cs}$  за сукупністю результатів усіх обстежень.

Зниження витрат на побудову детальних картосхем щільності забруднення ґрунту угідь радіонуклідами з одночасним забезпеченням необхідної деталізації картографування є актуальним завданням і має велике практичне та економічне значення. Одним із можливих підходів вирішення цього завдання є використання усієї сукупності результатів радіологічного моніторингу та окремих обстежень, проведених у різний час різними організаціями та використання кореляційної залежності між потужністю дози гамма-випромінювання і щільністю забруднення  $^{137}\text{Cs}$ . Розробка такої методології започаткована нами у роботах [6, 7]. Вона дає можливість при побудові картосхем  $A_{Cs}$  об'єднати інформацію, отриману в результаті прямих вимірювань  $^{137}\text{Cs}$  з інформацією, що міститься в ПЕД або ПАЕД на тому ж угідді. Це дає змогу отримати більш репрезентативні та деталізовані картосхеми значень  $A_{Cs}$ .

У даній роботі це завдання розглянуто у більш загальному вигляді. У різний час після аварії на ЧАЕС на аналізованих сільськогосподарських угіддях різними організаціями було проведено радіологічні обстеження, які мали різні програми й цілі, при виконанні яких поряд з іншими роботами вимірювалося значення

ПЕД/ПАЕД, проводився гамма-каротаж та відбиралися проби ґрунту, в яких визначався вміст  $^{137}\text{Cs}$ . За результатами гамма-каротажу на основі методики [8] оцінювалося значення щільності забруднення ґрунту  $^{137}\text{Cs}$  в точці і результати наносилися на картосхему. При цьому фіксувалися координати точок вимірювання ПЕД/ПАЕД та відбору проб ґрунту. Ґрунтуючись на кореляції між ПЕД/ПАЕД і щільністю забруднення ґрунту  $^{137}\text{Cs}$ , необхідно узагальнити усі наявні результати радіологічних обстежень і побудувати картосхему значень  $A_{Cs}$  на потрібний момент часу. Така методологія дасть змогу істотно поліпшити репрезентативність картосхем значень  $A_{Cs}$ .

## 2. Матеріали і методи

У даній роботі для апробування та демонстрації методології побудови картосхем  $A_{Cs}$  сільськогосподарських угідь за сукупністю результатів обстеження були використані результати різних радіологічних обстежень території Житомирської області, що отримані протягом 1988 - 2021 рр. співробітниками Науково-дослідного та проектного інституту землеустрою, землевідведення та земельного кадастру (НДПІ «Укрземпроект») [10], Державного геологічного підприємства «Кіровогеологія» [11], Українського науково-дослідного інституту сільськогосподарської ра-

діології Національного університету біоресурсів і природокористування України (УкрНДІСГР НУБіП України) у процесі виконання робіт за темами «Науковий супровід програми повернення в народногосподарське використання земель, забруднених внаслідок Чорнобильської катастрофи» [12], «Радіоекологічна оцінка території зони безумовного (обов'язкового) відселення Житомирської області» [13] і «Радіологічна оцінка сільськогосподарських угідь зони безумовного (обов'язкового) відселення з метою повернення їх в господарське використання» [14, 15]. Ці результати мають різну достовірність. Оскільки в даний час використовуються більш досконали вимірювальні прилади, то загалом результати, отримані в перші роки після аварії, є менш достовірними. Тому при побудові репрезентативних картосхем значень  $A_{Cs}$  їх слід використовувати як апіорні (перше наближення), проводити сучасні радіологічні обстеження хоча б у скороченому варіанті, результати яких дають змогу коригувати апіорну інформацію.

У роботі розглянуто забруднення  $^{137}\text{Cs}$  вилучених з господарського обігу ораних угідь колишнього господарства «Зоря комунізму» смт Народичі та с. Старе Шарне Народичького району Житомирської області. Точки вимірювання значень ПЕД і ПАЕД на цих угіддях і прилеглих територіях показано на рис. 1, а точки відбору проб ґрунту і визначення значень  $A_{Cs}$  – на рис. 2.



Рис. 1. Картосхема точок визначення значень ПЕД і ПАЕД: • - точки вимірювання значень ПЕД у 1988 р. [10];  $\diamond$  - точки вимірювання значень ПЕД у 1999 р. [12];  $\Delta$  - точки вимірювання значень ПЕД у 2005 р. [13];  $\circ$  - точки вимірювання значень ПАЕД у 2021 р. [14, 15]; — — — — — - межа вилучених з господарського обігу ораних угідь колишнього господарства «Зоря комунізму» смт Народичі та с. Старе Шарне; — — — — — - межа прилеглих до ораних угідь територій, результати обстеження яких враховувалися при побудові карт; — — — — — - межа зони зі щільністю забруднення ізотопами цезію від  $555 \text{ kBк/м}^2$  ( $15 \text{ Ki/км}^2$ ) та вище на травень 1986 р.; — — — — — - природний заповідник «Древлянський». (Див. кольоровий рисунок на сайті журналу.)

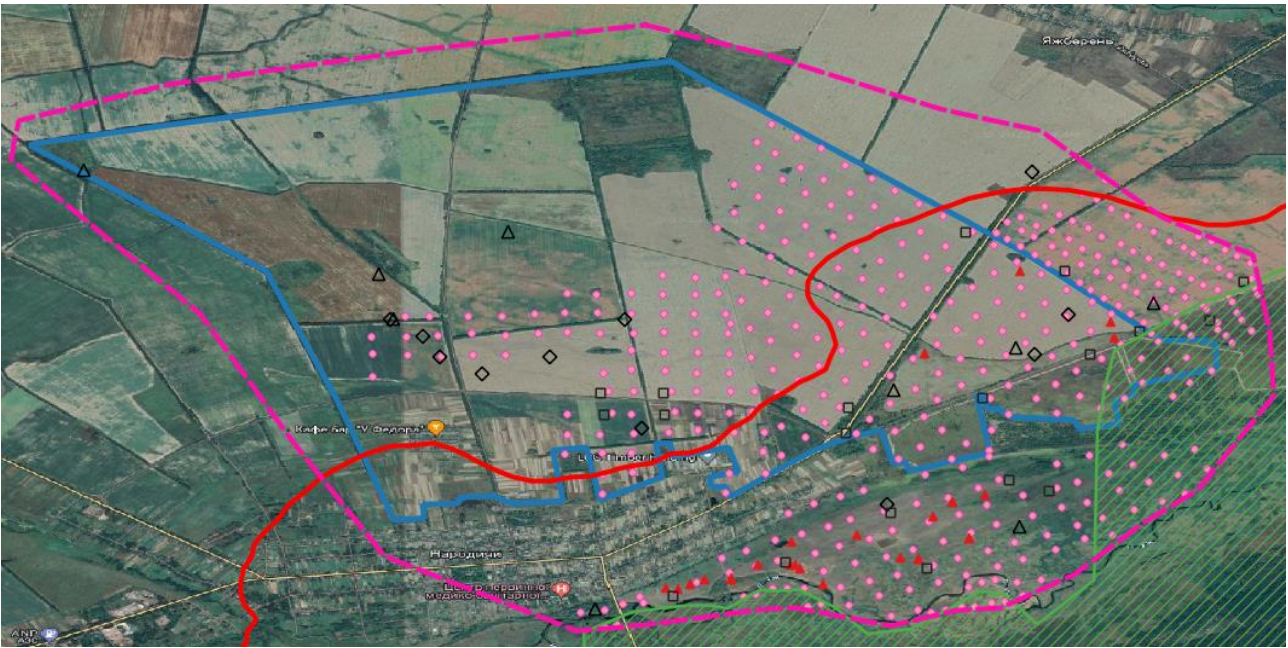


Рис. 2. Картохема точок визначення значень  $A_{Cs}$ :  $\bullet$  - точки проведення гамма-каротажу у 1997 р. [11];  $\square$  - точки відбору проб ґрунту і визначення прямих значень  $A_{Cs}$  у 1997 р. [11];  $\diamond$  - точки відбору проб ґрунту і визначення прямих значень  $A_{Cs}$  у 1999 р. [12];  $\Delta$  - точки відбору проб ґрунту і визначення прямих значень  $A_{Cs}$  у 2005 р. [13];  $\blacktriangle$  - точки відбору проб ґрунту і визначення прямих значень  $A_{Cs}$  у 2021 р. [14, 15]. (Див. кольоровий рисунок на сайті журналу.)

У перші роки після аварії на ЧАЕС вимірювання ПЕД (мкР/год) проводилося за допомогою дозиметр-радіометра ДРГ-01Т. Гамма-каротаж шпуром проводився за допомогою радіометра СРП-68-03 із залізним екраном. Точки шпурової зйомки розподілялися рівномірно площею з урахуванням характеру гамма-поля. Глибина шпурової зйомки була в інтервалі 15 - 30 см. Докладно це викладено у [8]. Вимірювання ПАЕД (мкЗв/год) проводилося за допомогою дозиметр-радіометра «Стора-ТУ». Усереднені похибки ( $p = 0,95$ ) ПЕД/ПАЕД у точках визначення прийняті на рівні 10 %.

Результати цих обстежень містять опосередковано чи безпосередньо інформацію про щільність забруднення угідь  $^{137}\text{Cs}$ . Метою цієї роботи є розробка практичної методології узагальнення цієї інформації та побудова детальної картохеми щільності забруднення угідь  $^{137}\text{Cs}$ .

На значення потужності дози, що спостерігається, в загальному випадку впливають різні фактори: радіонуклідний склад випадіння, зокрема вміст  $^{134}\text{Cs}$ , вертикальна міграція радіонуклідів (їхній розподіл за профілем ґрунту), час, що минув після аварії тощо. Значення ПЕД і ПАЕД включають природний гамма-фон. Оскільки для побудови картохеми щільності забруднення ґрунту  $^{137}\text{Cs}$  за сукупністю вимірювань потужності дози та прямих вимірювань щільності забруднення ґрунту  $^{137}\text{Cs}$  нас цікавить співвідношення «потужність дози - щільність забруднення ґрунту  $^{137}\text{Cs}$ », то значення потужності дози, що отримані

у перші роки після аварії, були скориговані (врахована частка, що обумовлена присутністю у ґрунті  $^{137}\text{Cs}$ ) відповідно до результатів роботи [16]. Зокрема для 1988 р. вона становить 0,54, для 1999 р. – 0,975, починаючи з 2003 р. – 1.

У перші роки після аварії на ЧАЕС на сільськогосподарських угіддях вимірювалася ПЕД (мкР/год) [10, 12, 13]. Після появи більш досконалої апаратури на угіддях стали вимірювати ПАЕД, (мкЗв/год) [14, 15]. У цій роботі при проведенні аналізу результатів радіологічних обстежень за допомогою результатів, що отримані в [17], значення ПЕД були конвертовані в значення ПАЕД: на ораних полях за допомогою співвідношення  $100 \text{ мкР/год} = 1,15 \pm 0,10 \text{ мкЗв/год}$ ; на луках і пасовищах за допомогою співвідношення  $100 \text{ мкР/год} = 1,07 \pm 0,05 \text{ мкЗв/год}$ . Тому далі за текстом використовується лише величина ПАЕД.

Карти потужності дози і щільності забруднення угіддя  $^{137}\text{Cs}$  – це за своєю суттю просторові функції координат місцевості ( $x, y$ ). Далі в роботі для стислості викладення використані позначення:  $D(x, y)$  – функція розподілу амбієнтного еквівалента дози;  $A_{Cs}(x, y)$  – функція розподілу щільності забруднення ґрунту  $^{137}\text{Cs}$ . Для просторової інтерполяції результатів вимірювань (побудови  $D(x, y)$  і  $A_{Cs}(x, y)$ ) буде використано ординарний і регресійний Крігінг (РК) у складі відкритих програмних продуктів QGIS і SAGA GIS.

Суть РК у тому, що він будує функцію  $A_{Cs}(x, y)$  у вигляді суми двох компонент

$$A_{Cs}(x, y) = \overline{A_{Cs}(x, y)} + \psi(x, y), \quad (1)$$

де:  $\overline{A_{Cs}(x, y)} = b_0 + b_1 \cdot D(x, y)$  – середнє значення (дрейф)  $A_{Cs}(x, y)$ , коефіцієнти  $b_0$  і  $b_1$  розраховуються на основі регресійного співвідношення між значеннями  $D(x, y)$  і результатами вимірювань щільності забруднення ґрунту  $^{137}\text{Cs}$  в точках відбору проб ґрунту;  $\psi(x, y)$  – функція, отримана методом ординарного Крігінга залишків між «прямими» вимірюваннями щільності забруднення ґрунту  $^{137}\text{Cs}$  ( $A_{Cs}(x_i, y_i)$ ) і прогнозними значеннями  $\overline{A_{Cs}(x, y)}$  в точках відбору проб ґрунту  $(x_i, y_i)$ :  $e(x_i, y_i) = A_{Cs}(x_i, y_i) - \overline{A_{Cs}(x_i, y_i)}$ .

Для коректного використання співвідношення, отримані у різні роки, значення  $A_{Cs}$ , ПЕД і ПАЕД з урахуванням напіврозпаду  $^{137}\text{Cs}$  були перераховані на 2021 р. Були використані такі міркування. Як видно з наведеного рис. 1, точки вимірювання потужності дози розташовані вкрай нерівномірно. Це обумовлено різними цілями та завданнями проведених радіологічних обстежень, що дещо ускладнює побудову узагальненої карти ПАЕД. Для побудови узагальненої карти ПАЕД необхідно перерахувати значення ПАЕД, отримані в різний час, на єдиний момент часу. Значення ПАЕД у точці  $(x, y)$  у момент часу  $t$  після аварії  $D_t(x, y)$  розглянемо у вигляді  $D_t(x, y) = D_{фон}(x, y) + D_{ч,t}(x, y)$ , де  $D_{фон}(x, y)$  – фонове значення потужності дози;  $D_{ч,t}(x, y)$  – потужність дози, що обумовлена чорнобильськими випадіннями  $^{137}\text{Cs}$ . Розглянемо два моменти вимірювання ПАЕД  $t_1$  і  $t_2$ , для визначеності  $t_2 > t_1$ . Значення чорнобильської компоненти ПАЕД у моменти часу  $t_1$  і  $t_2$  пов'язані співвідношенням

$$D_{ч,t_2}(x, y) = D_{ч,t_1}(x, y) \cdot e^{-(0,693/T_{1/2}) \cdot (t_2 - t_1)}, \quad (2)$$

де  $T_{1/2}$  – період напіврозпаду  $^{137}\text{Cs}$ .

Звідси, використовуючи розкладання експоненти в ряд, на основі виразу для  $D_t(x, y)$  та співвідношення (2), отримуємо лінійне співвідношення між  $D_{t_1}(x, y)$  і  $D_{t_2}(x, y)$

$$D_{t_2}(x, y) = D_{t_1}(x, y) - D_{ч,t_1} \cdot (0,693 / T_{1/2}) \cdot (t_2 - t_1),$$

$$D_{t_1}(x, y) = D_{t_2}(x, y) + D_{ч,t_1} \cdot (0,693 / T_{1/2}) \cdot (t_2 - t_1). \quad (3)$$

Таким чином, для перерахування ПАЕД у конкретній точці з моменту часу  $t_1$  на момент  $t_2$  або навпаки у першому наближенні, враховуючи співвідношення (3), необхідно використовувати лінійну модель виду

$$D_{t_2}(x, y) = a + b \cdot D_{t_1}(x, y) \text{ або}$$

$$D_{t_1}(x, y) = a' + b' \cdot D_{t_2}(x, y). \quad (4)$$

Такий алгоритм існує. Він реалізований в програмному забезпеченні географічної інформаційної системи SAGA GIS як метод РК [18, 19]. Він дає змогу отримати оцінку функції  $D_{t_2}(x, y)$  у момент  $t_2$  за сукупністю вимірювань ПАЕД у  $t_1$  і  $t_2$ , використовуючи лінійне кореляційне співвідношення (3), приймаючи за основу, як апіорну інформацію, результати вимірювань ПАЕД у момент  $t_1$  з подальшим коригуванням отриманого результату залишками між реальними результатами, отриманими в момент  $t_2$  і значеннями, обчисленими на основі співвідношення (3).

Щоб реалізувати цей алгоритм, необхідно хоча б для одного моменту часу мати картосхему значень ПАЕД (функцію  $D(x, y)$ ) для території, що розглядається. У нашому випадку така оцінка функції  $D(x, y)$  за допомогою SAGA GIS методом Крігінга може бути отримана на 1988 р. (найбільша кількість вимірювань ПЕД, рівномірно розташованих на вилучених з господарського обігу угіддях)  $D_{88}(x, y)$ . В інших випадках, якщо мало точок на момент  $t_2$ , необхідно значення, отримані на момент  $t_2$ , перерахувати на момент  $t_1$  «вручну».

Варіант 1. За допомогою SAGA GIS обчислити значення  $D_{t_1}(x, y)$  в точках вимірювань ПАЕД на момент  $t_2$   $D_{t_2}(x, y)$ . Отримавши значення  $D_{t_1}(x, y)$  і  $D_{t_2}(x, y)$  в тих же самих точках, оцінити параметри « $a'$ » і « $b'$ » (модель (3)) методом найменших квадратів та значення  $D_{t_2}(x, y)$  перерахувати на момент  $t_1$ .

Варіант 2. Як оцінку для фону ПАЕД у першому наближенні потрібно використати літературні дані, та відняти цю оцінку від вимірюного значення ПАЕД і використовувати співвідношення (1) для чорнобильської компоненти.

Результуюча оцінка функції  $D(x, y)$  на момент  $t_1$  за сукупністю результатів вимірювання в моменти  $t_1$  і  $t_2$  оцінюється за допомогою SAGA GIS методом Крігінга.

Таким чином, вище викладено методологію об'єднання значень ПЕД/ПАЕД, отриманих у різні роки різними організаціями для побудови узагальненої картосхеми розподілу ПАЕД (функції  $D_{sum}(x, y)$ ) на забруднених радіонуклідами територіях (угіддях). Ця функція є апіорною інформацією для побудови картосхеми щільності забруднення ґрунту  $^{137}\text{Cs}$  цієї території (угіддя).

У 1997 р. в точці проведення гамма-каротажу за його результатами на основі методики [8] оцінювалося значення  $A_{Cs}$ . Одночасно з проведенням гамма-каротажу відбиралися проби ґрунту

для прямих оцінок значень  $A_{Cs}$ . Точки проведення гамма-каротажу, отримані значення  $A_{Cs}$  та точки відбору проб ґрунту для визначення прямих значень  $A_{Cs}$  було нанесено на картосхему плану землекористування.

Визначення вмісту  $^{137}\text{Cs}$  в ґрунті проводилося гамма-спектрометричним методом. В УкрНДІСГР НУБіП України вимірювання проводилися на гамма-спектрометрі з напівпровідниковим детектором із високочистого германію “GEM-30185” фірми “EG & ORTEC”, США. Прилади пройшли державну повірку. Усереднені похибки щільності забруднення ґрунту  $^{137}\text{Cs}$  у точках відбору проб ґрунту 30 % [9].

Оцінка параметрів кореляційних залежностей проводилася методами найменших квадратів або максимуму правдоподібності [20, 21] з урахуванням типу розподілу ймовірностей радіологічних характеристик, що вимірювалися. У нашому випадку значення ПЕД/ПАЕД та щільність забруднення ґрунту  $^{137}\text{Cs}$  у місці їхнього вимірювання підкоряються логнормальним законам розподілу ймовірностей.

### 3. Побудова узагальненої карти ПАЕД за сукупністю всіх вимірювань

Результати вимірювання ПАЕД корелюють зі щільністю забруднення ґрунту  $^{137}\text{Cs}$  [5 - 7]. Карти ПАЕД є апіорною інформацією при побудові карти  $A_{Cs}$  за сукупністю результатів усіх обстежень. Для побудови карти розподілу ПАЕД на вилучених з господарського обігу угіддях колишнього господарства «Зоря комунізму» смт Народичі та с. Старе Шарне маємо таку інформацію (див. рис. 1): 351 точку вимірювань ПЕД у 1988 р.; 11 точок вимірювань ПЕД у 1999 р.; 9 точок вимірювань ПЕД у 2005 р.; 2295 точок вимірювань ПАЕД у 2021 р. У вимірюваннях 1988 і 1999 рр. враховувалася лише цезієва (чорнобильська) компонента. Значення ПЕД були конвертовані в ПАЕД відповідно до наведеного вище алгоритму і перераховані на 2021 р. (останній час вимірювання ПАЕД) відповідно до викладеного вище алгоритму: значення 1999 і 2005 рр. перераховані на значення 1988 р.; значення 1988 і 2021 рр. об'єднані за допомогою методу РК. Проекція отриманої оцінки функції  $D_{sum}(x, y)$  із сукупності даних 1988, 1999, 2005 і 2021 рр. (відповідні ізолінії) накладена на супутникову карту (рис. 3).



Рис. 3. Розподіл ПАЕД (мкЗв/год) на вилучених з господарського обігу полях колишнього господарства «Зоря комунізму» смт Народичі та с. Старе Шарне на 2021 р. за сукупністю всіх вимірювань ПЕД та ПАЕД. (Див. кольоровий рисунок на сайті журналу.)

Таким чином, на вищезазначеному прикладі, вилучених з господарського обігу полях колишнього господарства «Зоря комунізму» смт Народичі та с. Старе Шарне, викладена практична методологія побудови узагальненої картосхеми розподілу ПАЕД (функції  $D_{sum}(x, y)$ ) за сукупністю вимірювань ПЕД і ПАЕД у різні роки. Вона є апіорною інформацією для побудови картосхеми щільності забруднення ґрунту  $^{137}\text{Cs}$  (функції  $A_{Cs}(x, y)$ ).

### 4. Результати та обговорення

Детально розглянемо алгоритм побудови картосхем щільності забруднення ґрунту  $^{137}\text{Cs}$  за сукупністю всіх вимірювань; прямих з відбором проб ґрунту та непрямих (оцінок щільності забруднення ґрунту  $^{137}\text{Cs}$ , що отримані за результатами гамма-каротажу, вимірювань ПЕД і ПАЕД у різні роки). На прикладі реальних даних буде показано вплив апіорної інформації на репрезентативність та достовірність картосхем щільності забруднення ґрунту  $^{137}\text{Cs}$ .

#### 4.1. Побудова узагальноної картосхеми щільності забруднення ґрунту $^{137}\text{Cs}$ за сукупністю всіх вимірювань

Для побудови узагальноної картосхеми щільності забруднення ґрунту  $^{137}\text{Cs}$  за сукупністю всіх вимірювань (функції  $A_{Cs}(x, y)$ ) є три види апріорної інформації: узагальнена карта розподілу ПАЕД на 2021 р. за сукупністю вимірювань ПЕД і ПАЕД у різні роки (див. рис. 3); оцінки щільності забруднення ґрунту  $^{137}\text{Cs}$  на 1997 р. за результатами гамма-каротажу (355 значень); прямі вимірювання  $A_{Cs}$  у різні роки: 1997 р. – 19 вимірювань; 1999 р. – 11 вимірювань; 2005 р. – 9 вимірювань; 2021 р. – 26 вимірювань.

Для вирішення поставленого завдання необхідно об'єднати наявну апріорну інформацію та подати її у вигляді картосхеми  $A_{Cs}$  на 2021 р. Для цього скористаємося методом РК [20, 21]. На першому етапі, прийнявши за основу картосхему розподілу ПАЕД (див. рис. 3), об'єднаємо її з непрямыми оцінками щільності забруднення ґрунту  $^{137}\text{Cs}$  на 1997 р. у точках проведення гамма-каротажу, перерахувавши їх на 2021 р. з урахуванням розпаду  $^{137}\text{Cs}$ . У результаті отримуємо апріорну картосхему щільності забруднення ґрунту  $^{137}\text{Cs}$ , що враховує всю інформацію про щільність забруднення ґрунту у вимірюваннях ПЕД і ПАЕД у різні роки та в оцінках  $A_{Cs}$  за результатами гамма-каротажу (рис. 4).



Рис. 4. Апріорна картосхема щільності забруднення ґрунту  $^{137}\text{Cs}$  (кБк/м<sup>2</sup>) на вилучених з господарського обігу полях колишнього господарства «Зоря комунізму» смт Народичі та с. Старе Шарне на 2021 р. за сукупністю всіх вимірювань ПЕД, ПАЕД та результатами гамма-каротажу. (Див. кольоровий рисунок на сайті журналу.)



Рис. 5. Узагальнена картосхема щільності забруднення ґрунту  $^{137}\text{Cs}$  (кБк/м<sup>2</sup>) на вилучених з господарського обігу полях колишнього господарства «Зоря комунізму» смт Народичі та с. Старе Шарне на 2021 р. за сукупністю всіх даних. (Див. кольоровий рисунок на сайті журналу.)

Для побудови остаточної узагальненої карто-схеми щільності забруднення ґрунту  $^{137}\text{Cs}$  за сукупністю всіх вимірювань (за сукупністю вимірювань ПЕД і ПАЕД у різні роки, результатів гамма-каротажу та прямих вимірювань  $A_{Cs}$  у різні роки) також скористаємося методом РК, прийнявши за основу апіорну картосхему щільності забруднення ґрунту  $^{137}\text{Cs}$  (див. рис. 4). Результати прямих вимірювань  $A_{Cs}$  у різні роки перерахуємо на 2021 р. з урахуванням розпаду  $^{137}\text{Cs}$ . На рис. 5 наведено остаточну узагальнену картосхему щільності забруднення ґрунту  $^{137}\text{Cs}$ , яка відкоригована прямими вимірюваннями  $A_{Cs}$ , враховує всю наявну інформацію про щільність забруднення ґрунту для цих угідь (вимірювання ПЕД і ПАЕД у різні роки, непрямі оцінки  $A_{Cs}$  за результатами гамма-каротажу та прями вимірювання  $A_{Cs}$  у різні роки).

Таким чином, на прикладі вилучених з господарського обігу полях колишнього господарства «Зоря комунізму» смт Народичі та с. Старе Шарне продемонстровано методологію побудови картосхеми щільності забруднення  $^{137}\text{Cs}$  за сукупністю вимірювань ПЕД, ПАЕД, результатами

гамма-каротажу і безпосередніх значень щільності забруднення  $^{137}\text{Cs}$ , отриманих у різні роки.

#### 4.2. Вплив апіорної інформації на репрезентативність та достовірність картосхем щільності забруднення ґрунту $^{137}\text{Cs}$

Нижче на прикладі реальних даних та отриманих вище результатів показано вплив апіорної інформації на репрезентативність та достовірність картосхем щільності забруднення ґрунту  $^{137}\text{Cs}$ . На рис. 6, *a* наведено картосхеми щільності забруднення ґрунту  $^{137}\text{Cs}$ , що були побудовані виключно за результатами прямих вимірювань щільності забруднення ґрунту  $^{137}\text{Cs}$ , отриманих у різні роки. При побудові картосхеми на рис. 6, *б* за даними прямих вимірювань щільності забруднення ґрунту  $^{137}\text{Cs}$ , які були доповнені оцінками щільності забруднення ґрунту  $^{137}\text{Cs}$ , отриманими за результатами гамма-каротажу. Порівняння картосхем на рис. 6, *б* з картосхемою на рис. 5 наочно показує вплив апіорної інформації (результатів гамма-каротажу, сукупності вимірювань ПЕД і ПАЕД у різні роки) на репрезентативність та достовірність картосхем щільності забруднення ґрунту  $^{137}\text{Cs}$ .



*a*



*б*

Рис. 6. Картосхеми щільності забруднення ґрунту  $^{137}\text{Cs}$  ( $\text{кБк}/\text{м}^2$ ) на вилучених з господарського обігу полях колишнього господарства «Зоря комунізму» смт Народичі та с. Старе Шарне на 2021 р.: *a* – картосхеми щільності забруднення ґрунту  $^{137}\text{Cs}$ , побудована виключно за результатами прямих вимірювань щільності забруднення ґрунту  $^{137}\text{Cs}$  у різні роки; *б* – дані прямих вимірювань щільності забруднення ґрунту  $^{137}\text{Cs}$ , доповнені оцінками щільності забруднення ґрунту  $^{137}\text{Cs}$ , отриманими за результатами гамма-каротажу. (Див. кольоровий рисунок на сайті журналу.)

У розглянутому прикладі наявні результати прямих вимірювань (див. рис. 6, *a*) у першому наближенні характеризують реальну картину щільності угідь  $^{137}\text{Cs}$ , але не дають змоги говорити про її деталізацію та плями щільності забруднення  $^{137}\text{Cs}$ . При цьому оцінка середньої щільності забруднення становить  $363,4 \pm 78,8$ . Використання в якості апіорної інформації оцінок щільності забруднення ґрунту  $^{137}\text{Cs}$ , отриманими за результатами гамма-каротажу (див. рис. 6, *б*), дають можливість суттєво деталізувати картосхеми щільності забруднення ґрунту  $^{137}\text{Cs}$ . При цьому оцінка середньої щільності забруднення становить  $186,6 \pm 77,5$ . Використання в якості апіорної інформації всіх непрямих вимірювань (оцінок щільності забруднення ґрунту  $^{137}\text{Cs}$ ,

отриманих за результатами гамма-каротажу, вимірювань ПЕД і ПАЕД у різні роки (див. рис. 5), дає можливість суттєво деталізувати картосхеми щільності забруднення ґрунту  $^{137}\text{Cs}$  та плями щільності забруднення  $^{137}\text{Cs}$ . При цьому оцінка середньої щільності забруднення становить  $177,5 \pm 116,3$ .

#### 5. Висновки

Запропоновано методологію побудови картосхем щільності забруднення  $^{137}\text{Cs}$  ґрунту сільськогосподарських угідь за сукупністю вимірювань ПЕД, ПАЕД, оцінок  $A_{Cs}$  за результатами гамма-каротажу і результатами визначення безпосередніх значень щільності забруднення  $^{137}\text{Cs}$ , отриманих різними організаціями у різні роки. Дана

методологія узагальнює всю наявну інформацію про щільність забруднення ґрунту  $^{137}\text{Cs}$  на угідді, що розглядається. Це дає змогу побудувати картосхему щільності забруднення  $^{137}\text{Cs}$  на необхідний момент часу, поліпшує її репрезентативність і деталізацію.

Методологія апробована на прикладі вилучених з господарського обігу полях колишнього господарства «Зоря комунізму» смт Народичі та с. Старе Шарне Народицького району Житомирської області. Для апробації було використано результати радіологічних обстежень території Житомирської області, отриманих протягом 1988 - 2021 рр. НДП «Укрземпроект», Державним геологічним підприємством «Кіровгеологія», УкрНДІСГР НУБіП України у процесі виконання різних науково-дослідних робіт.

Використання апріорної інформації (непрямих вимірювань) для оцінки щільності забруднення ґрунту  $^{137}\text{Cs}$  дає змогу оцінювати її на тих

ділянках, де з тих чи інших причин не проводився відбір проб ґрунту і не було прямих вимірювань щільності забруднення ґрунту  $^{137}\text{Cs}$ . Використання прямих вимірювань щільності забруднення ґрунту  $^{137}\text{Cs}$  дає змогу суттєво скоригувати апріорні оцінки щільності забруднення ґрунту  $^{137}\text{Cs}$ , підвищити достовірність та репрезентативність одержуваної карти щільності забруднення ґрунту  $^{137}\text{Cs}$  сільськогосподарських угідь.

Запропонована методологія дасть можливість істотно заощадити час та кошти та поліпшити репрезентативність оцінок щільності забруднення угідь  $^{137}\text{Cs}$ , що дуже важливо для прийняття рішень про реабілітацію забруднених радіонуклідами сільськогосподарських угідь і повернення їх до господарського використання.

Автори висловлюють подяку НФД України за підтримку цієї роботи в рамках проекту № 2022.01/0188.

#### СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ

1. V.A. Kashparov et al. Soil contamination with  $^{90}\text{Sr}$  in the near zone of the Chernobyl accident. *J. Environ. Radioactivity* 56 (2001) 285.
2. V. Kashparov et al. Spatial datasets of radionuclide contamination in the Ukrainian Chernobyl Exclusion Zone. *Earth Syst. Sci. Data* 10 (2018) 339.
3. Н.А. Лоцилов и др. Экспресс-методика оценки плотности загрязнения сельскохозяйственных угодий радиоактивными изотопами цезия по данным гамма-съемки местности с учетом радионуклидного состава и распределения радионуклидов по профилю почвы (К.: Госагропром УССР, 1989) 12 с.
4. Н.О. Лоцилов, П.Ф. Бондарь, С.О. Лященко. Методичні вказівки по проведенню обстеження сільгоспугідь в господарствах забрудненої радіонуклідами зони у 1991 – 1992 рр. (К.: Міністерство сільського господарства УРСР, 1991) 11 с.
5. Ю.В. Хомутінін та ін. Картографування забруднених радіонуклідами сільськогосподарських угідь для повернення їх в господарське використання. *Ядерна фізика та енергетика* 20(3) (2019) 285.
6. Ю.В. Хомутінін и др. Оперативное картографирование загрязненных радионуклидами территорий. *Ядерна та радіаційна безпека* 3(83) (2019) 51.
7. Ю.В. Хомутінін, С.С. 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.
8. Методика определения плотности радиоактивного загрязнения почвы цезием-137 при детальном обследовании территорий, загрязненных выбросами Чернобыльской АЭС (К., Кировгеология, 1990).
9. Yu. Khomutinin et al. Optimising sampling strategies for emergency response: Soil sampling. *J. Environ. Radioactivity* 222 (2020) 106344.
10. Карти характеристик полів сівозмін, лук і пасовищ по гамма-фону в колгоспі «Зоря комунізму» смт Народичі с. С. Шарне Народицького району (Житомир, Житомирська філія державного підприємства «Науково-дослідний та проектний інститут землеустрою», 1988).
11. Отчет о результатах работ по повторному обследованию выведенных из севооборота земель Житомирской области. Договор № 2 от 22 августа 1995 года (К., 1998).
12. Л.В. Перепелятнікова та ін. Науковий супровід програми повернення в народногосподарське використання земель, забруднених внаслідок Чорнобильської катастрофи. Заключний звіт за договором № 14/69 Н-98 (К., УкрНДІСГР НУБіП України, 1999).
13. М.Я. Кривенок та ін. Радіоекологічна оцінка території зони безумовного (обов'язкового) відселення Житомирської області. Звіт про науково-дослідну роботу (К., Національний аграрний університет, 2005) 77 с.
14. Ю.В. Хомутінін та ін. Прогнозування надходження радіонуклідів  $^{137}\text{Cs}$  і  $^{90}\text{Sr}$  у сільськогосподарські культури. *Ядерна фізика та енергетика* 22(3) (2021) 284.
15. Ю.В. Хомутінін та ін. Оцінка можливості повернення в господарський обіг виведених, внаслідок аварії на ЧАЕС, пасовищ і сіножатей. *Ядерна фізика та енергетика* 23(1) (2022) 47.
16. V. Kashparov et al. Spatial radionuclide deposition data from the 60 km radial area around the Chernobyl Nuclear Power Plant: results from a sampling survey in 1987. *Earth Syst. Sci. Data* 12 (2020) 1861.



17. В.П. Рамзаев, А.Н. Барковский. К вопросу о связи между амбиентным эквивалентом дозы и поглощенной дозой в воздухе в условиях загрязнения окружающей среды радиоактивным цезием. *Радиационная гигиена* 8(3) (2015) 6.
18. T. Hengl, G.B.M. Heuvelink, A. Stein. A generic framework for spatial prediction of soil variables based on regression-kriging. *Geoderma* 120 (1-2) (2004) 75.
19. T. Hengl, G.B.M. Heuvelink, D.G. Rossiter. About regression-kriging: From equations to case studies. *Computers & Geosciences* 33 (2007) 1301.
20. А. Афифи, С. Эйзен. *Статистический анализ. Подход с использованием ЭВМ* (Москва: Мир, 1992) 488 с.
21. С.А. Айвазян, И.С. Енюков, Л.Д. Мешалкин. *Прикладная статистика. Исследование зависимостей* (Москва: Финансы и статистика, 1985) 488 с.

**Yu. V. Khomutinin\*, O. V. Kosarchuk, S. V. Polischuk**

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

\*Corresponding author: khomutinin@gmail.com

### MAPPING OF <sup>137</sup>Cs CONTAMINATION DENSITY ON AGRICULTURAL LANDS BASED ON THE SUMMARY OF THE SURVEY RESULTS

A methodology for mapping the density of <sup>137</sup>Cs contamination of agricultural land is proposed and tested. The methodology is based on data on gamma-dose rate measurements, gamma-logging results, and direct determination of <sup>137</sup>Cs in soil samples, which were obtained by different organizations in different years. It allows to generalize all available information on <sup>137</sup>Cs contamination of the lands and significantly improves the representativeness of estimates of the spatial distribution of the radionuclides at the mapping.

*Keywords:* mapping, <sup>137</sup>Cs soil contamination density, dose rate.

#### REFERENCES

1. V.A. Kashparov et al. Soil contamination with <sup>90</sup>Sr in the near zone of the Chernobyl accident. *J. Environ. Radioactivity* 56 (2001) 285.
2. V. Kashparov et al. Spatial datasets of radionuclide contamination in the Ukrainian Chernobyl Exclusion Zone. *Earth Syst. Sci. Data* 10 (2018) 339.
3. N.A. Loshchilov et al. Express-methodology of estimation of contamination density of agricultural lands with radioactive cesium isotopes according to gamma-survey data regarding radionuclide composition and radionuclide distribution along the soil profile (Kyiv: Gosagroprom of the Ukrainian SSR, 1989) 12 p. (Rus)
4. N.O. Loshchilov, P.F. Bondar, S.O. Lyashcheko. Methodical instructions for conducting surveys of agricultural land in farms of the radionuclide-contaminated zone in 1991 - 1992 (Kyiv: Ministry of Agriculture of the Ukrainian SSR, 1991) 11 p. (Ukr)
5. Yu.V. Khomutinin et al. Mapping of radionuclide-contaminated agricultural land to make them available for use. *Nucl. Phys. At. Energy* 20(3) (2019) 285. (Ukr)
6. Yu.V. Khomutinin et al. Prompt mapping of radioactively contaminated areas. *Nuclear and Radiation Safety* 3(83) (2019) 51. (Rus)
7. Yu.V. Khomutinin, S.E. Levchuk, V.V. Pavlyuchenko. Operative assessment of radioactive contamination of agricultural land for their return to use. *Nucl. Phys. At. Energy* 22(1) (2021) 74. (Ukr)
8. Methodology for determination of soil radioactive contamination density with cesium-137 during the detailed survey of territories contaminated by Chernobyl NPP releases (Kyiv, Kirovgeologia, 1990). (Rus)
9. Yu. Khomutinin et al. Optimising sampling strategies for emergency response: Soil sampling. *J. Environ. Radioactivity* 222 (2020) 106344.
10. Maps of the characteristics of crop rotation fields, meadows and pastures by gamma background in the collective farm "Zorya Komunizmu" in Narodychi village, Old Sharne village, Narodychi district (Zhytomyr, Zhytomyr branch of the State Enterprise "Research and Design Institute of Land Management", 1988). (Ukr)
11. Report on the results of works on the repeated survey of the lands withdrawn from crop rotation in Zhytomyr region. Contract No. 2 of August 22, 1995 (Kyiv, 1998). (Rus)
12. L.V. Perepelyatnikova et al. Scientific support of the program of returning the lands contaminated as a result of the Chernobyl disaster to the national economic use. Final report under the Contract No. 14/69 H-98 (Kyiv, Ukrainian Institute of Agricultural Radiology of the National University of Life and Environmental Sciences of Ukraine, 1999). (Ukr)
13. M.Ya. Kryvenok et al. Radioecological Assessment of the Territory of the Zone of Unconditional (Compulsory) Resettlement in the Zhytomyr Region. Report on research work (K., National Agrarian University, 2005) 77 p. (Ukr)

14. Yu.V. Khomutinin et al. Forecasting of  $^{137}\text{Cs}$  and  $^{90}\text{Sr}$  radionuclides intake into agricultural crops. *Nucl. Phys. At. Energy* 22(3) (2021) 284. (Ukr)
15. Yu.V. Khomutinin et al. Assessment of the possibility of a return to the original use of pastures and hayfields abandoned after the Chernobyl accident. *Nucl. Phys. At. Energy* 23(1) (2022) 47. (Ukr)
16. V. Kashparov et al. Spatial radionuclide deposition data from the 60 km radial area around the Chernobyl Nuclear Power Plant: results from a sampling survey in 1987. *Earth Sys. Sci. Data* 12 (2020) 1861.
17. V.P. Ramzaev, A.N. Barkovsky. To the question of the relationship between ambient dose equivalent and absorbed dose in air under conditions of environmental contamination with radiocaesium. *Radiatsionnaya Gigiyena* 8(3) (2015) 6. (Rus)
18. T. Hengl, G.B.M. Heuvelink, A. Stein. A generic framework for spatial prediction of soil variables based on regression-kriging. *Geoderma* 120 (1-2) (2004) 75.
19. T. Hengl, G.B.M. Heuvelink, D.G. Rossiter. About regression-kriging: From equations to case studies. *Computers & Geosciences* 33 (2007) 1301.
20. A. Afifi, S. Eisen. *Statistical Analysis. Approach with the use of Computers* (Moskva: Mir, 1992) 488 p. (Rus)
21. S.A. Ayvazyan, I.S. Enyukov, L.D. Meshalkin. *Applied Statistics. Investigation of Dependencies* (Moskva: Finansy i Statistika, 1985) 488 p. (Rus)

Надійшла/Received 29.08.2023