

# Оперативное картографирование загрязненных радионуклидами территорий

- **Хомутинин Ю. В.**  
*Украинский научно-исследовательский институт сельскохозяйственной радиологии Национального университета биоресурсов и природопользования Украины, Киев*  
ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-4205-4352>
- **Левчук С. Е.**  
*Украинский научно-исследовательский институт сельскохозяйственной радиологии Национального университета биоресурсов и природопользования Украины, Киев*  
ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-5167-7773>
- **Процак В. П.**  
*Украинский научно-исследовательский институт сельскохозяйственной радиологии Национального университета биоресурсов и природопользования Украины, Киев*  
ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-0986-6444>
- **Павлюченко В. В.**  
*Украинский научно-исследовательский институт сельскохозяйственной радиологии Национального университета биоресурсов и природопользования Украины, Киев*  
ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-0603-444X>
- **Кашпаров В. А.**  
*Украинский научно-исследовательский институт сельскохозяйственной радиологии Национального университета биоресурсов и природопользования Украины, Киев*  
ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-6460-1049>

Разработана методология оперативного картографирования загрязненных радионуклидами территорий. Оперативность получения картографической информации достигается использованием корреляционных зависимостей между характеристиками радиоактивного загрязнения, полученных при различных радиологических обследованиях загрязненных территорий. Для формализации данных по радиоактивному загрязнению используется метод пространственной интерполяции на основе регрессионного кригинга, что позволяет объединить информацию, полученную в результате прямых измерений плотности загрязнения территории по интересующему нас радионуклиду, с информацией, содержащейся в других характеристиках радиоактивного загрязнения, полученных на обследуемом участке, например, мощность эквивалентной дозы облучения (МЭД). Такой подход позволяет более адекватно реальному загрязнению картографировать плотность выпадения  $^{137}\text{Cs}$  и концентрацию его активности в корнеобитаемом слое почвы, а так же существенно сократить время и затраты на обследование картографируемой территории (пробоотбор, пробоподготовку и измерение образцов), что в свою очередь значительно ускоряет и удешевляет процесс построения карт радиоактивного загрязнения территории (полей, угодий, участков). Предложенная методология апробирована на загрязненных вследствие аварии на ЧАЭС сельскохозяйственных угодьях, расположенных в Народичском, Полесском и Ивановском районах, и показала свою работоспособность и эффективность. Сравнение и анализ полученных карт радиоактивного загрязнения территории показывает, что в условиях ограниченного количества данных прямых измерений и лимита времени использование корреляционных зависимостей между характеристиками радиоактивного загрязнения почвы, часто является единственно возможным путем повышения информативности и точности получаемой картографической информации.

**Ключевые слова:** плотность радиоактивного загрязнения, мощность экспозиционной дозы, картографирование радиоактивного загрязнения, регрессионный кригинг.

© Хомутинин Ю. В., Левчук С. Е., Процак В. П., Павлюченко В. В., Кашпаров В. А., 2019

В условиях чрезвычайных ситуаций получение оперативной информации является важнейшим условием принятия адекватных сложившейся ситуации решений. Это в полной мере относится и к радиационным авариям, что доказывает опыт ликвидации последствий аварий на Чернобыльской и Фукусимской АЭС. В острый период радиационной аварии необходимы данные о характеристиках и распределении радиоактивного загрязнения на местности, для принятия решения о необходимости эвакуации и ее масштабах, а также для планирования и оптимизации защитных мероприятий. В отдаленный период аварии возникают задачи реабилитации загрязненных радионуклидами территорий, в частности, возвращения в хозяйственное использование сельскохозяйственных и лесных угодий [1, 2]. Решение данных задач невозможно без наличия детальных карт загрязнения территории в первую очередь по  $^{137}\text{Cs}$  и  $^{90}\text{Sr}$ , как наиболее радиологически значимых радионуклидов. Как показала практика решение подобных задач это связано со значительными материальными затратами, обусловленными пробоотбором, пробоподготовкой и проведением измерений образцов [1, 2]. Поэтому задачи оптимизации картографирования загрязненных радионуклидами территорий являются актуальными и имеют большое практическое и экономическое значение.

Одним из возможных подходов снижения затрат на оперативное картографирование является использование корреляционных зависимостей между характеристиками радиоактивного загрязнения получаемых при различных радиологических обследованиях. В настоящей работе представлены результаты использования данного подхода для оптимизации построения картограмм радиоактивного загрязнения сельскохозяйственных угодий.

## Методы

Распределение характеристики радиоактивного загрязнения по территории (МЭД, плотность поверхностного загрязнения радионуклидами, удельное содержание радионуклидов в почве) описывается некоторой

непрерывной функцией  $F(x, y)$  координат местности  $(x, y)$ , которая нам неизвестна, а известны лишь результаты её измерений  $F_1, F_2, \dots, F_n$  в точках  $(x_i, y_i)$   $i=1 \dots n$ . Эта совокупность пространственно-распределенных данных в общем случае не регулярно расположена и является основой для нахождения некоторого приближения (модели) функции  $F(x, y) \cong G(F_1, F_2, \dots, F_n)$  и построения карты рассматриваемой характеристики радиоактивного загрязнения территории. Для решения этой задачи применяются геостатистические методы интерполяции. Среди них наиболее широкое распространение получил кригинг (kriging) [3, 4]. Если данные имеют распределение Гаусса, то обеспечивается минимум погрешности прогнозируемых значений функции  $G(x, y)$  и является лучшим интерполятором среди всех несмещенных интерполяторов.

Однако его непосредственное применение для картографирования плотности поверхностного загрязнения территории радионуклидами (или их удельного содержания в корнеобитаемом слое почвы) при малом числе точек измерения не дает удовлетворительного результата. Увеличение числа точек измерений требует значительных затрат и времени на обследование картографируемого участка территории.

Альтернативой методу кригинга, для оценки плотности поверхностного загрязнения территории, является регрессионный подход, в основе которого лежит регрессионная зависимость между плотностью поверхностного загрязнения  $A$  ( $\text{кБк}/\text{м}^2$ ) и некоторой характеристикой радиоактивного загрязнения территории  $D$ , значения которой можно измерить быстро и с минимальными затратами в различных точках участка  $G(x, y) = \Psi(D(x, y))$ . В случае линейной регрессии эта зависимость имеет вид

$$G(x, y) = b_0 + b_1 \cdot D(x, y), \quad (1)$$

где коэффициенты регрессии  $b_i$  оцениваются методами математической статистики на основе сопряженной выборки. Для плотности поверхностного загрязнения территории  $^{137}\text{Cs}$  такой характеристикой  $D$  является МЭД. Значения  $D(x, y)$  в произвольной точке картографируемого участка на основе

измеренных значений  $D$  оцениваются (интерполируются) методом кригинга.

Однако, регрессионный подход к оценке плотности поверхностного загрязнения территории имеет существенный недостаток. Он позволяет быстро и с минимальными затратами оценить и картографировать только средние значения плотности поверхностного загрязнения (её дрейф) и не учитывает её локальные особенности.

Регрессионный кригинг — это метод пространственной интерполяции, который сочетает в себе преимущество регрессионного подхода и кригинга [5, 6]. Он позволяет объединить информацию, полученную в результате прямых измерений плотности загрязнения территории (концентрации активности в корнеобитаемом слое почвы), интересующего нас радионуклида, с информацией, содержащейся в других характеристиках радиоактивного загрязнения, полученных на обследуемом участке (например, в МЭД). Это позволяет более адекватно реальному загрязнению картографировать плотность выпадения  $^{137}\text{Cs}$  и концентрацию его активности в корнеобитаемом слое почвы.

Однако следует помнить, что применение рассмотренных выше методов интерполяции с точки зрения математической статистики корректно только в том случае, если значение  $F(x_p, y_i)$  и остатки  $G(x_p, y_i) - F(x_p, y_i)$  имеют нормальное (Гаусса) распределение вероятностей. В нашем случае это условие не выполняется, поскольку наблюдаемые значения МЭД, концентрации активности радионуклидов в почве и плотности загрязнения радионуклидами территории описываются соответствующими логнормальными законами распределения вероятностей, что хорошо показано в работах [7, 8, 9, 10]

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

где:  $X$  — значение характеристики загрязнения;  $\mu$  и  $s$  — среднее значение и стандартное отклонение логарифма величины  $X$ .

Чтобы обойти это несоответствие, методы кригинга и регрессионного кригинга

необходимо применить к логарифмам величин  $F(x_p, y_i)$ ,  $D(x_p, y_i)$  и использовать корреляционную зависимость  $g(x, y) = b_0 + b_1 \cdot \ln(D(x, y))$  между сопряженными значениями  $\ln(F(x_p, y_i))$  и  $\ln(D(x_p, y_i))$ .

Изложенный выше подход достаточно универсален. Он позволяет оперативно картографировать загрязненные радионуклидами территории в целом ряде случаев.

Нами, для валидации изложенного подхода и построения карт радиоактивного загрязнения сельскохозяйственных угодий (плотность загрязнения по  $^{137}\text{Cs}$  и содержание  $^{90}\text{Sr}$  в пахотном слое почвы) были использованы следующие сценарии:

*Сценарий 1. Картографирование загрязнения почвы  $^{137}\text{Cs}$ .* На участке проведено детальное измерение МЭД. В части точек этого участка одновременно с измерением МЭД определялось значение плотности поверхностного загрязнения  $^{137}\text{Cs}$  (или удельная активность). На основе этих данных оценена корреляционная зависимость:  $g(x, y) = b_0 + b_1 \cdot \ln(D(x, y))$ ;

*Сценарий 2. Картографирование загрязнения почвы  $^{137}\text{Cs}$ .* На участке проведено детальное измерение МЭД. В части точек этого участка одновременно с измерением МЭД определялось значение плотности поверхностного загрязнения  $^{137}\text{Cs}$  (или удельная плотность). Корреляционная зависимость  $g(x, y)$  между  $\ln(F(x_p, y_i))$  и  $\ln(D(x_p, y_i))$  оценена на основе совокупности данных картографируемого участка и данных, полученных на других участках;

*Сценарий 3. Картографирование загрязнения почвы  $^{137}\text{Cs}$ .* На участке проведено детальное измерение МЭД. Значения плотности поверхностного загрязнения  $^{137}\text{Cs}$  (или удельная активность) на участке не определялись. Корреляционная зависимость  $g(x, y)$  между  $\ln(F(x_p, y_i))$  и  $\ln(D(x_p, y_i))$  оценена на основе совокупности данных, полученных на других участках;

*Сценарий 4. Картографирование загрязнения почвы  $^{90}\text{Sr}$ .* На участке проведены измерения плотности поверхностного загрязнения  $^{137}\text{Cs}$  (удельная активность). В части точек этого участка одновременно с измерением  $^{137}\text{Cs}$  определялось значение плотности поверхностного загрязнения  $^{90}\text{Sr}$  (или концентрация его активности в пахотном слое

почвы). Корреляционная зависимость  $g(x,y)$  между  $Ln(F(x_p, y_i))$  и  $Ln(D(x_p, y_i))$  оценена на основе совокупности данных картографируемого участка и данных, полученных на других участках.

Для апробирования изложенного подхода и картографирования радиоактивного загрязнения были взяты поля, на западном и южном следах чернобыльских радиоактивных выпадений (около с. Осыка Народицкого района, около с. Раговка Полесского района, около с. Дитятки Иванковского района). Ниже приведены полученные результаты.

**Результаты оперативного картографирования загрязненных радионуклидами сельскохозяйственных угодий и их обсуждение**

На полях в окрестностях сел Осыка и Раговка в 2017–2018 гг. были проведены детальные измерения мощности экспозиционной дозы  $D$ : Осыка — в 1534 точках; Раговка — в 703 точках. В отдельных точках производился сопряженный отбор проб почвы для гамма-спектрометрического определения плотности поверхностного загрязнения  $^{137}\text{Cs}$ : Осыка — в 19 точках; Раговка — в 38 точках. На рисунке 1 приведены полученные на основе этих данных регрессионные зависимости между логарифмом мощности экспозиционной дозы  $D$  (мкЗв/год) и логарифмом плотности поверхностного загрязнения  $^{137}\text{Cs}$   $A$  (кБк/м<sup>2</sup>).

Для поля в окрестностях с. Осыка эта зависимость имеет вид  $Ln(A) = 8,20(\pm 0,32) + 1,83(\pm 0,2) \cdot Ln(D)$  при коэффициенте корреляции 0,91, а для поля в районе с. Раговка —  $Ln(A) = 7,5(\pm 0,47) + 1,47(\pm 0,26) \cdot Ln(D)$  при коэффициенте корреляции 0,7. Различие между этими зависимостями статистически незначимо (рис. 1). Обобщенная зависимость имеет вид  $Ln(A) = 7,81(\pm 0,32) + 1,65(\pm 0,18) \cdot Ln(D)$ .

Для иллюстрации изложенного подхода на рисунках 2 и 3 приведены карты плотности поверхностного загрязнения  $^{137}\text{Cs}$  (кБк/м<sup>2</sup>), для двух полей построенные, как на основе только прямых измерений плотности

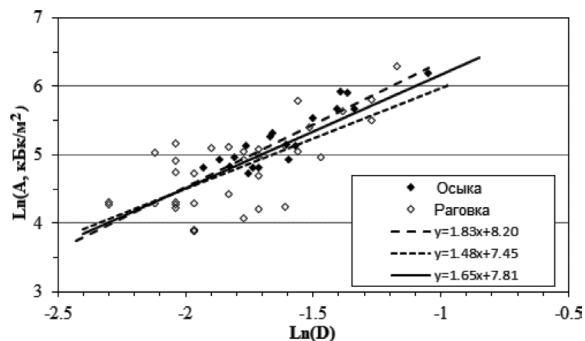


Рисунок 1 — Соотношение между логарифмом мощности экспозиционной дозы (мкЗв/час) и логарифмом плотности поверхностного загрязнения  $^{137}\text{Cs}$ , кБк/м<sup>2</sup>

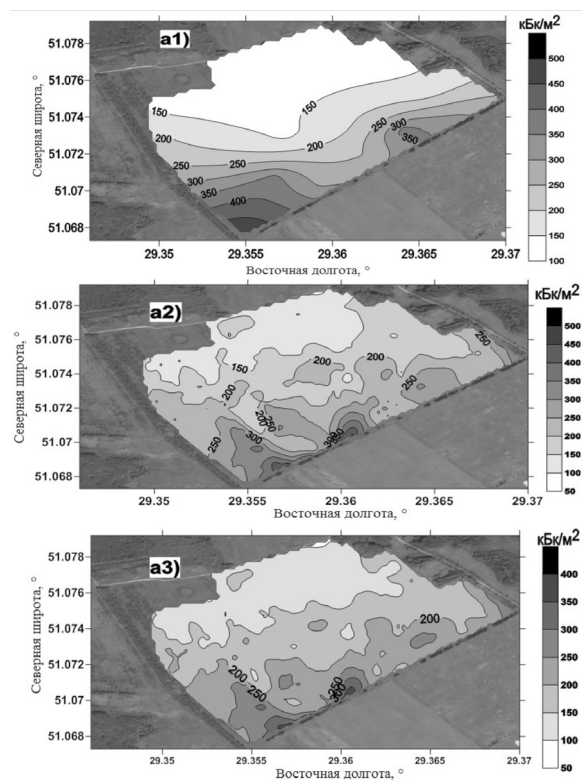


Рисунок 2 — Плотность поверхностного загрязнения  $^{137}\text{Cs}$  поля в окрестности с. Осыка на 2018 год: a1 — на основе только прямых измерений плотности поверхностного загрязнения; a2 — с учетом индивидуальных регрессионных зависимостей между логарифмом мощности экспозиционной дозы  $D$  и логарифмом плотности поверхностного загрязнения  $^{137}\text{Cs}$ ; a3 — с учетом обобщенной регрессионной зависимости между логарифмом мощности экспозиционной дозы  $D$  и логарифмом плотности поверхностного загрязнения  $^{137}\text{Cs}$

поверхностного загрязнения в точках пробоотбора, так и предложенного выше подхода с учетом индивидуальных и обобщенных регрессионных зависимостей между логарифмом мощности экспозиционной дозы  $D$  и логарифмом плотности поверхностного загрязнения  $^{137}\text{Cs}$ .

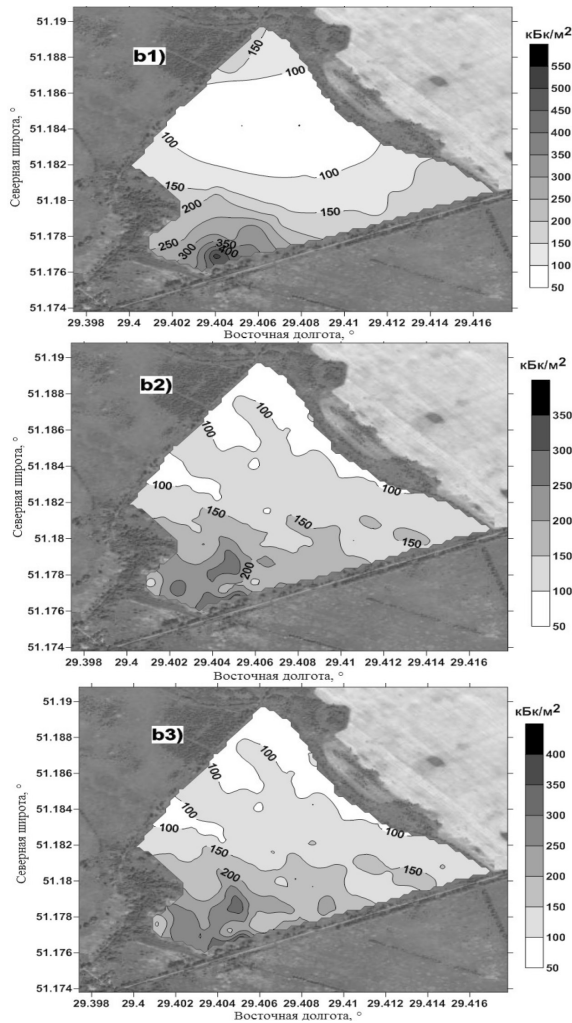


Рисунок 3 — Плотность поверхностного загрязнения  $^{137}\text{Cs}$  поля в окрестности с. Раговка на 2018 год: b1 — на основе только прямых измерений плотности поверхностного загрязнения; b2 — с учетом индивидуальных регрессионных зависимостей между логарифмом мощности экспозиционной дозы D и логарифмом плотности поверхностного загрязнения  $^{137}\text{Cs}$ ; b3 — с учетом обобщенной регрессионной зависимости между логарифмом мощности экспозиционной дозы D и логарифмом плотности поверхностного загрязнения  $^{137}\text{Cs}$

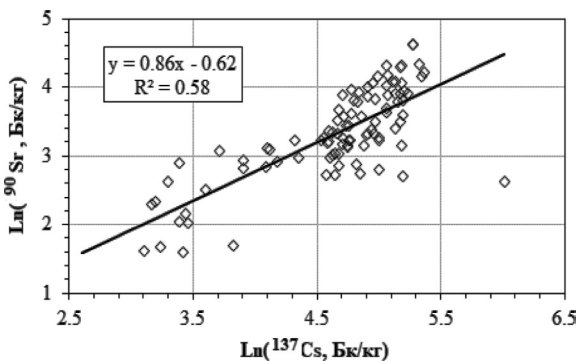


Рисунок 4 — Соотношение между логарифмом удельного содержания  $^{137}\text{Cs}$  и логарифмом удельного содержания  $^{90}\text{Sr}$  в сопряженных образцах пахотного слоя почвы

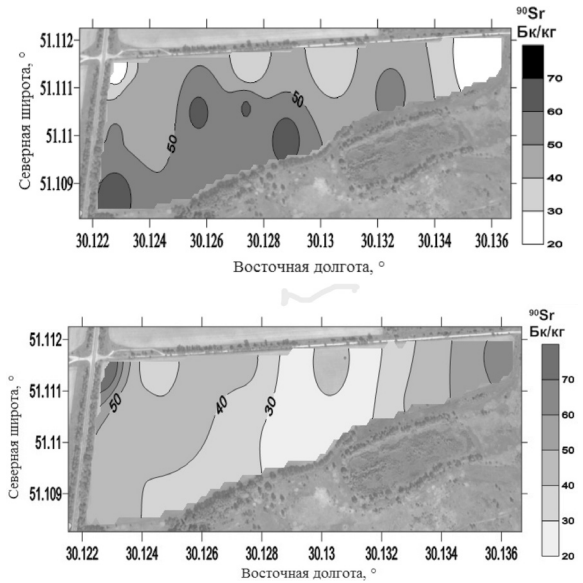


Рисунок 5 — Концентрация активности  $^{90}\text{Sr}$  в пахотном слое почвы в окрестности с. Дитятки на 2018 год: а) — на основе только прямых измерений  $^{90}\text{Sr}$ ; б) — на основе прямых измерений  $^{90}\text{Sr}$  и  $^{137}\text{Cs}$  и с учетом регрессионной зависимости между логарифмом удельного содержания  $^{137}\text{Cs}$  и логарифмом удельного содержания  $^{90}\text{Sr}$

На полях Иванковского района в течение 2011–2018 гг. проводился мониторинг содержания  $^{137}\text{Cs}$  и  $^{90}\text{Sr}$  в зерне сельскохозяйственных культур с одновременным измерением концентрации активности этих радионуклидов в пахотном слое почвы. Всего было получено 97 сопряженных значений содержания  $^{137}\text{Cs}$  и  $^{90}\text{Sr}$  в пахотном слое почвы. Эти результаты были пересчитаны на 2018 год. На рисунке 3 приведена полученная на основе этих данных регрессионная зависимость между логарифмами удельного содержания  $^{137}\text{Cs}$  и  $^{90}\text{Sr}$  в пахотном слое почвы.

Данная регрессионная зависимость использовалась для картографирования удельного содержания  $^{90}\text{Sr}$  в пахотном слое почвы поля, расположенного восточнее с. Дитятки Иванковского района Киевской области.

На рисунке 5 приведены карты концентрации активности  $^{90}\text{Sr}$  пахотном слое почвы одного и того же поля, одна из которых построена на основе только результатов прямых измерений  $^{90}\text{Sr}$ , а другая на основе прямых измерений  $^{90}\text{Sr}$  и  $^{137}\text{Cs}$ , с учетом регрессионной зависимости между логарифмом удельного содержания  $^{137}\text{Cs}$  и логарифмом удельного содержания  $^{90}\text{Sr}$ .

Сравнение и анализ полученных карт показывает, что в условиях ограниченно-го количества данных прямых измерений

и лимита времени использование корреляционных зависимостей между характеристиками радиоактивного загрязнения почвы, часто, является единственным возможным путем повышения информативности и точности получаемой картографической информации.

## Выводы

Использование пространственной интерполяции на основе регрессионного кригинга для нахождения корреляционных зависимостей между различными характеристиками радиоактивного загрязнения территории позволяет значительно ускорить и удешевить процесс получения данных для построения достоверных карт радиоактивного загрязнения. Апробация предложенного подхода и использование для построения карт радиоактивного загрязнения сельскохозяйственных угодий чернобыльскими радионуклидами показала его работоспособность и эффективность.

## Список использованной литературы

1. Kashparov V., Levchuk S., Zhurba M., Protsak V., Khomutinin Yu., Beresford N.A., Chaplow J.S. Spatial datasets of radionuclide contamination in the Ukrainian Chernobyl Exclusion Zone. *Earth System Science Data (ESSD)*. V.10. 2018. P. 339–353. — URL: <https://www.earth-syst-sci-data.net/10/339/2018/>
2. Labunska I., Kashparov V., Levchuk S., Santillo D., Johnston P., Polishchuk S., Lazarev N., Khomutinin Y. Current radiological situation in areas of Ukraine contaminated by the Chernobyl accident: Part 1. Human dietary exposure to Caesium-137 and possible mitigation measures. *Environment International*. V. 117. August 2018. P. 250–259. — URL: <https://doi.org/10.1016/j.envint.2018.04.053>.
3. Мальцев К.А., Мухарамова С.С. Построение моделей пространственных переменных (с применением пакета Surfer). Казань: Казанский университет, 2014. 103 с.
4. Демьянов В. В., Савельева Е. А. Геоestatистика: теория и практика. Ин-т проблем безопасного развития атомной энергетики РАН. М. : Наука. 2010. 327 с.
5. Hengl, T., Heuvelink, G., Stein, A. A generic framework for spatial prediction of soil variables based

on regression-kriging. *Geoderma*. V.122 (1–2). 2004. P.75–93. — URL: <http://citeseerx.ist.psu.edu/viewdoc/download?doi=10.1.1.699.7306&rep=rep1&type=pdf>.

6. Hengl, T., Heuvelink, G., Rossiter D. About regression-kriging: From equations to case studies. *Computers & Geosciences*. V. 33. 2007. P. 1301–1315. — URL: [https://www.researchgate.net/publication/223155790\\_About\\_regression-kriging\\_From\\_equations\\_to\\_case\\_studies](https://www.researchgate.net/publication/223155790_About_regression-kriging_From_equations_to_case_studies).

7. Хомутинин Ю.В., Кашпаров В.А., Жебровская Е.И. Оптимизация отбора и измерений проб при радиоэкологическом мониторинге. Киев: ВІПОЛ. 2001. 160 с.

8. Хомутинин Ю.В. Оптимизация пробоотбора при оценке плотности радиоактивных выпадений. *Зб. наукових праць Інституту Ядерних Досліджень*. 2003. № 1(9). С.145–155.

9. Хомутинін Ю.В., Левчук С. Є. Павлюченко В. В. Оптимізація відбору проб ґрунту при картуванні щільності радіоактивних випадань. *Вісник Житомирського університету*. № 1 (55). Т.3. 2016. С. 74–84.

10. Хомутинин Ю.В., Глуховский О.С., Протцак В.П., Кашпаров В.А., Левчук С.Е., Павлюченко В.В. Картографирование «пятен» радиоактивного загрязнения. *Ядерна і радіаційна безпека*. № 2(78). 2018. С. 35–40. — URL: [https://www.sstc.com.ua/documents/journal/2018/2/Texts/8\\_2\\_2018\\_text.pdf](https://www.sstc.com.ua/documents/journal/2018/2/Texts/8_2_2018_text.pdf).

## References

1. Kashparov, V., Levchuk, S., Zhurba, M., Protsak, V., Khomutinin, Yu., Beresford, N., Chaplow, J. (2018). Spatial datasets of radionuclide contamination in the Ukrainian Chernobyl Exclusion Zone. *Earth System Science Data (ESSD)*, 10, 339–353. Retrieved from <https://www.earth-syst-sci-data.net/10/339/2018/>.
2. Labunska, I., Kashparov, V., Levchuk, S., Santillo, D., Johnston, P., Polishchuk, S., Lazarev, N., Khomutinin, Yu. (2018). Current radiological situation in areas of Ukraine contaminated by the Chernobyl accident: Part 1. Human dietary exposure to Caesium-137 and possible mitigation measures. *Environment International*, 117, 250–259. Retrieved from <https://doi.org/10.1016/j.envint.2018.04.053>.
3. Maltsev, K., Mukharamova, S. (2014). Creation of spatial variable models (using Surfer package). Kazan, Kazan University, 103.
4. Demianov, V., Savelieva, E. (2010). *Geostatistics: Theory and Practice*. Institute for Problems of Safe Development of Nuclear Energy, Russian Academy of Sciences, Moscow, Nauka, 327.
5. Hengl, T., Heuvelink, G., Stein, A. (2004). A generic framework for spatial prediction of soil variables based on regression-kriging. *Geoderma*, 122 (1–2), 75–93.

Retrieved from <http://citeseerx.ist.psu.edu/viewdoc/download?doi=10.1.1.699.7306&rep=rep1&type=pdf>

6. Hengl, T., Heuvelink, G., Rossiter, D. (2007). About regression-kriging: From equations to case studies. *Computers & Geosciences*, 33, 1301–1315. Retrieved from

[https://www.researchgate.net/publication/223155790\\_About\\_regression-kriging\\_From\\_equations\\_to\\_case\\_studies](https://www.researchgate.net/publication/223155790_About_regression-kriging_From_equations_to_case_studies).

7. Khomutinin, Yu., Kashparov, V., Zhebrowska, E. (2001). Optimization of sampling and sample measurement in radioecological monitoring. Kyiv, VIPOL, 160.

8. Khomutinin, Yu. (2003). Optimization of sampling in assessing density of radioactive fallout. *Collection of Scientific Works of the Institute of Nuclear Research*, 1(9), 145–155.

9. Khomutinin, Yu., Levchuk, S., Pavliuchenko, V. (2016). Optimization of soil sampling when mapping the density of radioactive fallout. *Bulletin of Zhytomyr University*, 3, 74–84.

10. Khomutinin, Yu., Glukhovskiy, O., Protsak, V., Kashparov, V., Levchuk, S., Pavliuchenko, V. (2018). Mapping of Spots of Radioactive Contamination. *Nuclear and Radiation Safety*, 2(78), 35–40. Retrieved from [https://www.sstc.com.ua/documents/journal/2018/2/Texts/8\\_2\\_2018\\_text.pdf](https://www.sstc.com.ua/documents/journal/2018/2/Texts/8_2_2018_text.pdf).

## Оперативне картографування забруднених радіонуклідами територій

**Хомутинін Ю. В., Левчук С. Є., Процак В. П., Павлюченко В. В., Кашпаров В. О.**

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

Розроблено методологію оперативного картографування забруднених радіонуклідами територій. Оперативність отримання картографічної інформації досягається використанням кореляційних залежностей між характеристиками радіоактивного забруднення, отриманими під час різних радіологічних обстежень забруднених територій. Для формалізації даних за радіоактивним забрудненням використовується метод просторової інтерполяції на основі регресійного крігінга, що дозволяє об'єднати інформацію, отриману під час прямих вимірювань щільності забруднення території конкретним радіонуклідом, з інформацією, що міститься в інших характеристиках радіоактивного забруднення, отриманих на обстежуваній ділянці (наприклад, потужність еквівалентної дози опромінення). Такий підхід дозволяє більш адекватно реальному забрудненню картографувати щільність випадіння  $^{137}\text{Cs}$  і концентрацію його активності в кореневмісному шарі ґрунту, а також істотно скорочує час і витрати на обстеження території, що картографується (пробовідбір, пробопідготовка та вимірювання зразків), що зі свого боку значно прискорює і здешевлює процес побудови карт радіоактивного забруднення території (полів, угідь, ділянок). Запропонована методологія апробована на забруднених внаслідок аварії

на ЧАЕС сільськогосподарських угіддях, розташованих в Народицькому, Поліському та Іванківському районах, і показала свою працездатність і ефективність. Порівняння та аналіз отриманих карт радіоактивного забруднення території показали, що в умовах обмеженої кількості даних прямих вимірювань і ліміту часу використання кореляційних залежностей між характеристиками радіоактивного забруднення ґрунту, часто, є єдиною можливим шляхом підвищення інформативності й точності отриманої картографічної інформації.

**Ключові слова:** щільність радіоактивного забруднення, потужність експозиційної дози, картографування радіоактивного забруднення, регресійний крігінг.

## Prompt Mapping of Radioactively Contaminated Areas

**Khomutinin Yu., Levchuk S., Protsak V., Pavliuchenko V., Kashparov V.**

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

The paper presents a methodology for prompt mapping of radioactively contaminated areas. The efficiency of obtaining cartographic information is achieved by using correlation dependences between the characteristics of radioactive contamination obtained during various radiological surveys of contaminated areas. The method of spatial interpolation based on regression-kriging is used to formalize the data on radioactive contamination. This method allows combining the information resulting from direct measurements of density of territory contamination by radionuclides we are interested in with the information contained in other characteristics of radioactive contamination received at the surveyed area (for example, ER). Such an approach allows more accurate mapping of  $^{137}\text{Cs}$  deposition density and concentration of its activity in the root layer of soil, as well as significant reduction of the time and cost to survey the mapped area (sampling, sample preparation and measurement of samples). This, in turn, accelerates and reduces the cost for mapping of radioactively contaminated territories (fields, lands, sites). The methodology has been tested on the fields contaminated by radionuclides resulting from the Chernobyl accident in the Narodychi, Polissia and Ivanivka Districts and has proved its performance and efficiency. Comparison and analysis of the obtained maps of radioactive contamination of the territory show that in the conditions of limited amount of data on direct measurements and time limit, the use of correlation dependences between the characteristics of radioactive contamination of soil is often the only possible way to increase the information content and accuracy of the obtained cartographic information.

**Keywords:** radioactive contamination density, exposure dose rate, mapping of radioactive contamination, regression-kriging.

Отримано 21.05.2019