

Ю. В. Хомутинин, О. С. Глуховский,
В. П. Процак, В. А. Кашпаров, С. Е. Левчук,
В. В. Павлюченко

Украинский научно-исследовательский институт
сельскохозяйственной радиологии Национального
университета биоресурсов и природопользования Украины,
г. Киев, Украина

Картографирование пятен радиоактивного загрязнения

Предложена методология и разработан алгоритм картографирования и оконтуривания пятен радиоактивного загрязнения территории ^{137}Cs . В основу методологии положен широко используемый в геологоразведочных работах принцип многостадийности (последовательных приближений). При этом значение плотности загрязнения территории ^{137}Cs в каждой точке рассматривается как случайная величина с логнормальным распределением вероятностей. Реализация алгоритма основана на оптимизации количества точек пробоотбора, необходимых для оценки плотности загрязнения почвы с заданной относительной погрешностью при выделении «пятна» загрязнения. Результаты тестирования алгоритма подтвердили эффективность и устойчивость его работы, а также простоту практического применения. Предложенная методология позволяет существенно минимизировать затраты на полевые работы по отбору проб почвы и измерение в них содержания радионуклидов.

Ключевые слова: плотность радиоактивного загрязнения, картографирование радиоактивного загрязнения, выделение и оконтуривание пятен радиоактивного загрязнения.

Задачи по уточнению характеристик радиоактивного загрязнения на локальных участках территории стали возникать в последнее время все чаще. Прежде всего, это связано с возвратом части загрязненных в результате Чернобыльской аварии земель в сельскохозяйственное использование, уточнением границ отдельных пятен радиоактивного загрязнения, выявлением и картографированием участков территории, радиоактивное загрязнение которых обусловлено техногенной деятельностью (места дислокации воинских подразделений, задействованных в ликвидации последствий аварии на Чернобыльской АЭС, территория пунктов специальной обработки техники, пункты захоронения отходов дезактивации и др.). Картографирование — наиболее информативный и наглядный метод представления данных о радиационной обстановке на местности, информационная основа для разработки прогнозов, рекомендаций и оптимизации принятия решений, направленных на обеспечение экологической безопасности населения контролируемой территории. В то же время отсутствие единого подхода к детализации отображения радиационной ситуации на местности определяет потребность в разработке методов, приемов и подходов к выявлению и картографированию пятен радиоактивного загрязнения. Существующие геостатистические методы построения изолиний (кригинг, метод обратных расстояний и др.) не предусматривают процедуру оптимизации числа точек измерения для обеспечения заданной точности картирования. В них по умолчанию заложен принцип: чем больше точек измерения на обследуемой территории, тем точнее будут построены изолинии. При этом предпочтение отдается регулярной сети пробоотбора.

Цель статьи — предложить методологию и реализацию на ее основе алгоритма, позволяющего производить картографирование радиоактивно загрязненных территорий с заданной детализацией при минимальном количестве исходных данных. В основу предлагаемой методологии положен хорошо зарекомендовавший себя в практике проведения геологоразведочных работ многостадийный процесс [1–4], предусматривающий последовательное проведение поисковых работ, предварительной и детальной разведки.

Разработанная методология позволяет обеспечить картографирование радиоактивного загрязнения для экологического управления территорией на всех уровнях — национальном, региональном и локальном — при минимальных затратах, связанных с проведением пробоотбора образцов почвы и их анализом.

Методология выделения пятен радиоактивного загрязнения территории

Общепринятыми характеристиками радиоактивного загрязнения территории являются плотность выпадений радионуклидов на поверхность или удельное содержание их в почве, растениях, воде [5, 6]. Не нарушая общности подхода, в данной работе в качестве характеристики радиоактивного загрязнения территории будем рассматривать плотность выпадений ^{137}Cs .

Модель плотности выпадений — это математическое описание плотности выпадений некоторой функцией от координат местности $f(x, y)$. Наша задача — восстановить данную функцию (найти ее приближение) для некоторой территории с приемлемой (заданной) погрешностью на основе пространственно-распределенных данных (измерений в узлах нерегулярной сетки) с наименьшими затратами материальных средств и времени.

В работах, посвященных опробованию месторождений полезных ископаемых [7–10] и оценке плотности радиоактивных выпадений [11–13], показано, что содержание различных радиоактивных изотопов в одном месте является случайной величиной. При этом плотность распределения вероятностей в конкретном месте (в точке) хорошо описывается логнормальным законом. В этой работе плотность выпадений ^{137}Cs в точке (x, y) будем рассматривать как случайную величину с логнормальным законом распределения вероятностей:

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

где $\mu(x, y)$ — средний логарифм плотности выпадений ^{137}Cs в точке (x, y) ; $s(x, y)$ — стандартное отклонение логарифма плотности выпадений ^{137}Cs в точке (x, y) .

В источниках [11–13] показано, что стандартное отклонение $s(x, y)$ для квазиоднородных безградиентных по загрязнению площадках не зависит от плотности и типа радиоактивных выпадений, ландшафтных особенностей Украинского Полесья и обработки почвы: $s(x, y) = s = \text{const}$.

Исходя из сказанного, модель плотности выпадений ^{137}Cs $f(x, y)$ будет построена на основе теории случайных функций (процессов) и случайных полей [14–16]. При этом в каждой точке рассматриваемой территории значение плотности загрязнения будет случайной величиной с распределением вероятностей (1).

В общем случае модель плотности выпадений $f(x, y)$ при решении рассматриваемой задачи должна иметь три составляющие:

фоновое загрязнение территории ^{137}Cs (средняя плотность загрязнения местности, окружающей места с повышенной плотностью загрязнения);

пятна плотности загрязнения (места с повышенной плотностью загрязнения ^{137}Cs на среднем фоне);

случайную составляющую, характеризующую микрооднородность выпадений в точке и включающую в себя погрешности, обусловленные методикой и процессом отбора проб почвы, подготовкой их к измерению, методикой и процессом измерения.

Плотность загрязнения ^{137}Cs на обследуемом участке территории будем рассматривать в виде мультипликативной модели:

$$f(x, y) = A_0 \cdot \prod_{i=1} f_i(x, y) \cdot f_r,$$

где A_0 — фоновое загрязнение территории ^{137}Cs на обследуемом участке (средняя плотность загрязнения местности, окружающей места с повышенной плотностью загрязнения); $\prod_{i=1} f_i(x, y)$ — произведение безразмерных функций,

описывающих кратность возрастания (пятна) на фоне средней плотности загрязнения местности, окружающей пятна; f_r — безразмерная случайная компонента, не зависящая от координат точки на обследуемой территории и имеющая логнормальный закон распределения вероятностей с медианой, равной 1.

Такой вид функции $f(x, y)$ очень удобен тем, что результат ее логарифмирования $z(x, y) = \ln(f(x, y))$ становится аддитивной моделью:

$$z(x, y) = a_0 + \sum_{i=1} z_i(x, y) + z_r, \quad (2)$$

где a_0 — средний логарифм плотности фонового загрязнения территории на обследуемом участке; $\sum_{i=1} z_i(x, y)$ —

сумма безразмерных функций, описывающих пятна на фоне среднего логарифма фоновой плотности загрязнения территории на обследуемом участке; z_r — безразмерная случайная компонента, не зависящая от координат точки на обследуемой территории и имеющая нормальный закон распределения вероятностей с математическим ожиданием 0.

Выделение пятна плотности радиоактивного загрязнения почвы на фоне равномерного загрязнения обследуемой территории и его картографирование является задачей того же класса, что и выделение первичного геохимического ореола в геологии (обнаружение аномальных концентраций химических элементов) [17]. На основе результатов опробования обследуемой территории в модели (2) необходимо оценить параметр a_0 (медиану логарифма плотности загрязнения) и оконтурить пятно $z_i(x, y)$. Для характеристики контрастности ореола и выделения аномальных концентраций химических элементов на фоновом пространстве в геологии используют коэффициент аномальности — отношение оценки среднего содержания элемента по ореолу к величине геохимического фона. В нашем случае для выделения аномалий («пятен») на фоне квазиоднородного радиоактивного загрязнения результаты измерений характеристики радиоактивного загрязнения на обследуемой территории рассматриваются как случайная выборка из смеси двух логнормальных распределений. Первое распределение характеризует «фоновый» для обследуемой территории уровень радиоактивного загрязнения, второе распределение характеризует аномальные значения радиоактивного загрязнения — «пятна». Для логарифмов результатов измерения z_i это будет смесь нормальных распределений, имеющая вид

$$\Phi_{\text{см}}(z) = \alpha \cdot \Phi(z; m_1; s_0) + (1 - \alpha) \cdot \Phi(z; m_2; s_{sp}), \quad (3)$$

где $\Phi(\dots)$ — распределение Гаусса; $m_1, (m_2)$ — среднее значение логарифма характеристики «фоновое» радиоактивного загрязнения («пятен»); s_0 — стандартное отклонение логарифма характеристики «фоновое» радиоактивного загрязнения, которое считаем априори известным; s_{sp} — стандартное отклонение логарифма характеристики радиоактивного загрязнения в области «пятен»; α — доля выборки, характеризующая «фоновое» загрязнение.

Если в результате статистического анализа выборки z_i оценка α будет статистически не значима ($\alpha \approx 1$), то на данной территории «пятно» отсутствует, и все различия в значениях z_i объясняются вариабельностью s_0 .

В [11–13] показано, что минимально необходимое число проб (n), которое нужно отобрать на квазиоднородной безградиентной по загрязнению площадке для оценки медианы плотности загрязнения почвы тем или иным радионуклидом с заданной относительной погрешностью δ при доверительной вероятности p , определяется соотношением

$$n \geq \left(\frac{U_p}{\ln(1 + \delta)} \right)^2 \cdot s_0^2, \quad (4)$$

где U_p — квантиль нормального распределения уровня p .

Таблица 1. Консервативные значения s_{er} и s_{ar} (с учетом погрешностей их величин) при условии $n_0 = 1$ и определении активности радионуклидов в образцах почвы объемом 100 см³

Дисперсия логарифма	$d_{me}, \%$ (для 2σ)			
	10	20	30	40
<i>Вне зоны отчуждения ЧАЭС для ^{137}Cs, ^{90}Sr и $^{238,239,240}\text{Pu}$</i>				
s_{er}	0,08	0,09	0,10	0,12
s_{ar}	0,29	0,30	0,32	0,35
<i>В зоне отчуждения ЧАЭС для ^{137}Cs (конденсационная компонента)</i>				
s_{er}	0,08	0,09	0,10	0,12
s_{ar}	0,29	0,30	0,32	0,35
<i>В зоне отчуждения ЧАЭС для ^{90}Sr и $^{238,239,240}\text{Pu}$ (топливная компонента)</i>				
s_{er}	0,09	0,09	0,11	0,12
s_{ar}	0,30	0,31	0,33	0,35

Дисперсия логарифма плотности загрязнения почвы на безградиентной по загрязнению площадке

$$s_0^2 = s_{er}^2 + s_{ar}^2, \quad (5)$$

где s_{ar}^2 — дисперсия логарифма плотности радиоактивных выпадений между точками площадки; s_{er}^2 — дисперсия логарифма плотности загрязнения почвы радионуклидом в точке:

$$s_{er}^2 = \frac{s_{het}^2 + s_{me}^2}{n_0}, \quad (6)$$

где n_0 — число взятых от пробы почвы образцов (навесок) на измерение содержания радионуклидов; s_{het}^2 — дисперсия квадратического отклонения логарифма активности пробы почвы, обусловленная неоднородностью распределения активности в объеме пробы; s_{me}^2 — дисперсия логарифма плотности загрязнения почвы радионуклидом в точке, обусловленная погрешностью измерения:

$$s_{me}^2 = \ln \left(\left(\frac{\delta_{me}}{200} \right)^2 + 1 \right),$$

где δ_{me} — статистическая погрешность измерения активности радионуклида в образце, которая, как правило, берется на уровне двух стандартных отклонений (2σ) и выражается в процентах.

Экспериментальные значения s_{er} и s_{ar} для различных погрешностей измерений (δ_{me}) и использовании по одной навеске от каждой отобранной пробы ($n_0 = 1$) приведены в табл. 1. Некоторое отличие значения s_{er} и s_{ar} для территории зоны отчуждения и за ее пределами обусловлено влиянием остатков чернобыльских топливных частиц (топливной компоненты) в ближней зоне Чернобыльской АЭС.

Усредненные оценки среднего квадратического отклонения логарифма активности пробы почвы, обусловленные

Таблица 2. Значения среднего квадратического отклонения логарифма активности пробы почвы, обусловленные неоднородностью ее распределения в объеме пробы (s_{het}) для различных радионуклидов в зависимости от места пробоотбора

Территория пробоотбора почвы	s_{het}	
	^{137}Cs	^{90}Sr , $^{238,239,240}\text{Pu}$
Зона отчуждения ЧАЭС	0,06±0,01	0,08±0,02
За пределами зоны отчуждения ЧАЭС	0,05±0,02	

неоднородностью распределения активности в объеме измеряемой пробы (s_{het}), при использовании стандартных методик пробоподготовки приведены в табл. 2 [11].

Алгоритм выделения пятен радиоактивного загрязнения территории

В основу алгоритма выделения пятен плотности радиоактивного загрязнения почвы или МЭД, как и при геохимическом обследовании, положен принцип стадийности (последовательных приближений).

Первая стадия (предварительная разведка). На этой стадии информация о степени радиоактивного загрязнения выбранной территории, как правило, отсутствует. Эта ситуация подробно рассмотрена в [11–13].

Точки отбора проб (измерений) будем располагать квазислучайным образом на рассматриваемой территории, руководствуясь следующим алгоритмом:

1. На карте обследуемый участок территории оконтуриваем некоторым прямоугольником.

2. Исходя из оговоренных в техническом задании требований к оценке загрязнения обследуемой территории (относительной погрешности d и доверительной вероятности p), используя соотношение (3) и значения, приведенные в табл. 1 и 2 для расчета s_0 , определяем минимально необходимое число отбираемых проб n .

3. В границах выбранного участка случайным образом (квазиравномерно) намечаем не менее чем n точек измерений (отбора проб).

4. После проведения измерений (отбора проб) получаем не менее чем n эмпирических значений плотности загрязнения почвы радионуклидом $f_i(x_i, y_i)$ ($i = 1, 2, \dots, n$).

5. Логарифмируем полученные значения, получаем величины z_i и строим вариационный ряд $Z_{\min} \dots Z_i \dots Z_{\max}$.

6. Используя полученный вариационный ряд $Z_{\min} \dots Z_i \dots Z_{\max}$, проводим статистический анализ его распределения и оцениваем величину α . Если при уровне значимости 0,05 полученная оценка для α не отличается от единицы, то на обследуемом участке пятно отсутствует. Если $1 - \alpha > 0$, первые $\alpha \cdot n$ значений вариационного ряда относятся к фоновому загрязнению, а остальные $m = (1 - \alpha) \cdot n$ значений характеризуют пятно.

Вторая стадия (детальная разведка, выделение пятен радиоактивного загрязнения территории). Основная задача на этой стадии — картографирование радиоактивного загрязнения обследуемой территории с заданной относительной погрешностью d при доверительной вероятности p . Чтобы решить поставленную задачу, необходимо

оценить медиану плотности загрязнения, а также оконтурить пятно (пятна) с повышенной плотностью загрязнения на карте заданного масштаба. Для этого:

1. Как и на первой стадии обследования, на карте оконтурим вспомогательным прямоугольником участок, где расположены m аномальных значений z_j .

2. На остальной территории (с равномерным загрязнением) для получения оценки медианы плотности загрязнения почвы с заданной относительной погрешностью δ при доверительной вероятности p отбираем еще m проб.

3. Поскольку искомое пятно загрязнения в первом приближении рассматривается как квазиоднородная безградиентная площадка, для оценки медианы плотности загрязнения на оконтуренном участке (с относительной погрешностью δ и доверительной вероятностью p) минимально необходимое число отбираемых проб также равно n . Оконтуренный участок «пятна» уже включает m проб, отобранных на первой стадии обследования, соответственно на нём дополнительно добираем не менее чем $n - m$ проб почвы (измерений МЭД).

4. Медиана плотности загрязнения почвы на обследуемой территории с равномерным загрязнением оценивается по эмпирическим значениям загрязнения почвы в n точках ($n - m$ проб отобраны на первой стадии и m проб отобраны на второй стадии обследования).

5. В заключение в картографическом пакете строим карту плотности загрязнения обследуемой территории по не менее чем $2n$ точкам и «пятно» оконтуриваем изолиниями оговоренного уровня.

Результаты и обсуждение

Для опробования и тестирования предложенного алгоритма выделения и оконтуривания пятен радиоактивного загрязнения использованы результаты картирования территории Иванковского района Киевской области по ^{137}Cs , проведенного в 2014 году [18]. Тестовая площадка была выбрана в окрестности н. п. Ораное, где по результатам картирования отмечено пятно загрязнения почвы ^{137}Cs (рис. 1, а).

Если бы тестовая площадка была квазиоднородной (безградиентной) по загрязнению ^{137}Cs , для оценки медианы плотности загрязнения с относительной погрешностью $d=10\%$ при доверительной вероятности $p=0,95$ и определении активности ^{137}Cs в одном образце почвы с погрешностью 10% ($\pm 2\sigma$) в соответствии с соотношением (4) необходимо отобрать 22 пробы. На территории этой площадки в 2014 году было отобрано 12 проб (рис. 1, б, темные точки). Для тестирования предложенного алгоритма в 2017 году нами было отобрано еще 10 проб (рис. 1, б, светлые точки). Все значения плотности загрязнения почвы ^{137}Cs , полученные на 2014 год, пересчитаны на 2017 год. В результате после первой стадии обследования мы располагали 22 значениями плотности загрязнения почвы ^{137}Cs на выбранной тестовой площадке $f(x_i, y_i)$.

После логарифмирования значений $f(x_i, y_i)$ и упорядочения результатов по возрастанию (построения вариационного ряда) получаем эмпирическую плотность распределения $\Phi(z)$ (рис. 2), которую аппроксимируем смесью нормальных распределений (3). В результате получены следующие значения параметров $\Phi_{\text{см}}(z)$: $\alpha=0,82\pm 0,07$; $m_1=4,09\pm 0,01$; $m_2=4,74\pm 0,04$; $s_{sp}=0,13\pm 0,06$. Таким образом, последние в вариационном ряде $m=(1-\alpha)\cdot n \approx 4$

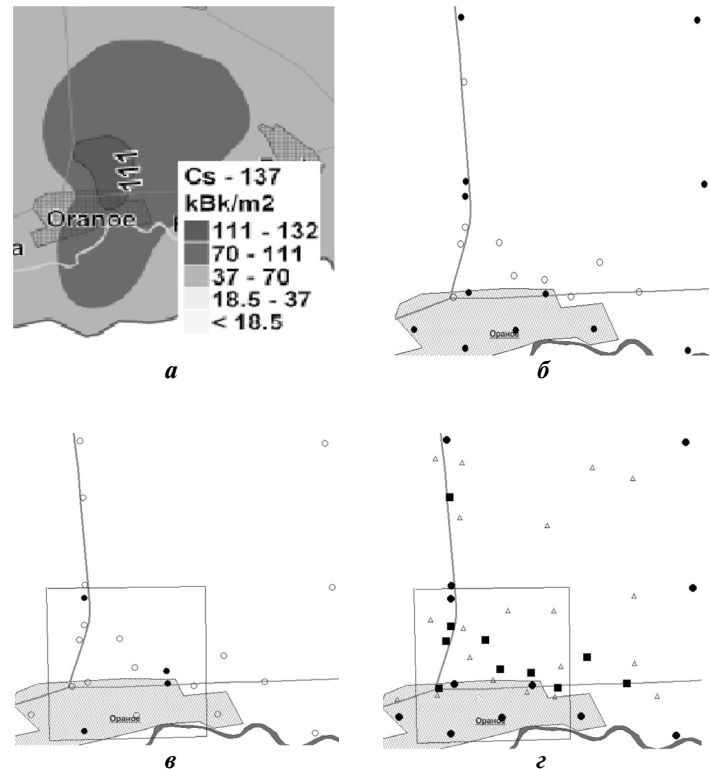


Рис. 1. Территория тестирования алгоритма выделения пятна загрязнения с указанием местоположения точек пробоотбора: а — плотность загрязнения территории ^{137}Cs по результатам пробоотбора 2014 года; б — точки пробоотбора для первой стадии выделения пятна загрязнения (● — отбор 2014 г., ○ — добор 2017 г.); в — точки (●) с резко выделяющимися значениями по результатам первой стадии обследования; з — точки пробоотбора для второй стадии выделения пятна: ● — точки отбора проб в 2014 году; ■ — точки добора проб (для первой стадии); △ — дополнительные точки пробоотбора для второй стадии выделения пятна загрязнения

значений плотности загрязнения характеризуют «пятно» (рис. 2, темные точки). Их расположение на карте показано на рис. 1, в (темные точки).

Предполагаемое место «пятна» оконтурено прямоугольником (рис. 1, в).

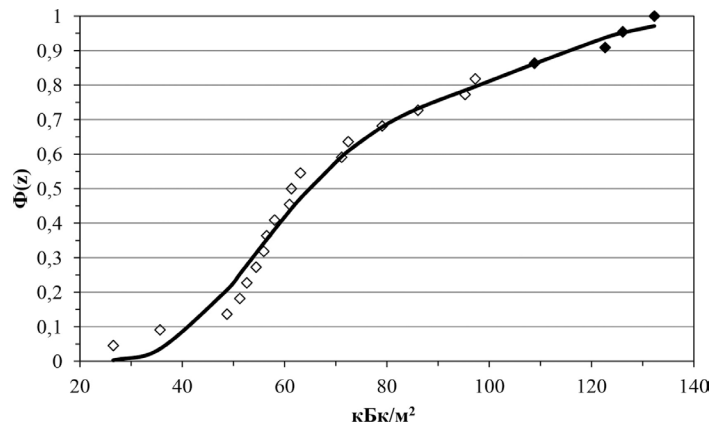


Рис. 2. Функция распределения вероятностей плотности загрязнения почвы ^{137}Cs на обследуемом участке по результатам первой стадии обследования

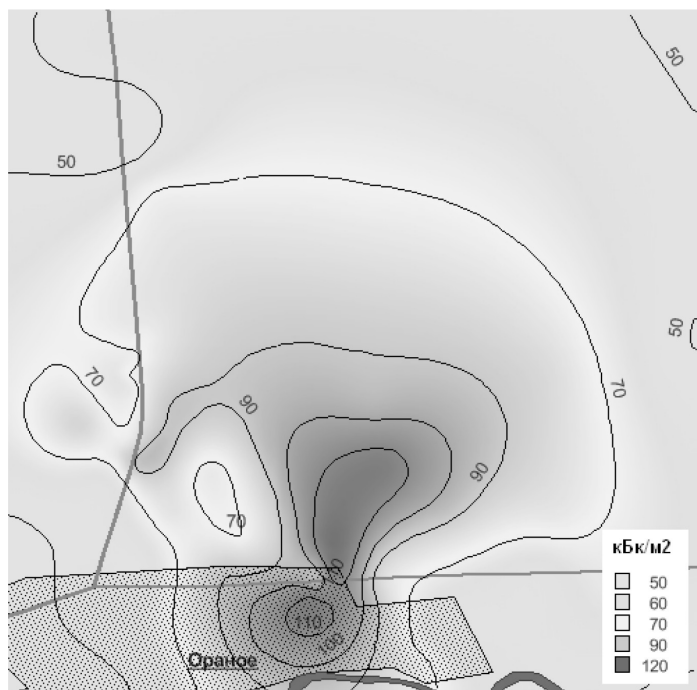


Рис. 3. Плотность загрязнения почвы ^{137}Cs , $\text{кБк}/\text{м}^2$, в окрестностях н. п. Ораное Иванковского района Киевской области на 2017 год

Для уточнения конфигурации «пятна» радиоактивного загрязнения в районе н. п. Ораное, на второй стадии обследования проведен дополнительный отбор и измерения ^{137}Cs еще в 22 точках: 10 — на территории ожидаемого пятна, 12 — на территории с квазиоднородным загрязнением. На рис. 1, 2 приведена схема расположения всех точек измерения плотности загрязнения почвы ^{137}Cs на обследуемом участке по результатам двух стадий обследования.

Таким образом, для выделения и картирования «пятна» загрязнения почвы ^{137}Cs в окрестностях н. п. Ораное использовано 44 эмпирических значений функции $f(x, y)$.

Для построения карты с изолиниями использовалась ГИС MAPINFO и метод Inverse Distance to a Power (IDW) — метод обратных взвешенных расстояний. Полученная карта представлена на рис. 3.

Как видно из рис. 3, построенная карта характеризуется значительной пространственной детализацией радиоактивного загрязнения на исследуемом участке территории.

Выводы

Предложенный алгоритм выделения и оконтуривания пятен радиоактивного загрязнения, опробованный при обследовании территории Иванковского района Киевской области, подтвердил свою работоспособность и эффективность. Устойчивость его работы и простота практического применения позволяют рекомендовать этот алгоритм как для построения карт радиоактивного загрязнения, так и решения частных задач, связанных с уточнением и детализацией радиоактивного загрязнения на локальных участках территории. Предложенная методология обеспечивает минимизацию количества необходимых почвенных проб для построения карт загрязнения с заданной точностью, а соответственно, оптимизацию затрат

на проведение полевых работ, связанных с пробоотбором, а также затрат, связанных с определением содержания радионуклидов в отобранных пробах.

Предложенный алгоритм планируется использовать для оценки распределения радиоактивного загрязнения на территориях бывших дислокаций воинских подразделений, задействованных в ликвидации последствий аварии на Чернобыльской АЭС. Предварительный анализ таких территорий указывает на значительную пространственную неоднородность и пятнистость радиоактивного загрязнения.

Список использованной литературы

1. Михайлов А. Е. Структурная геология и геологическое картирование. М. : Недра, 1984. 464 с.
2. Кузнецов О. Л., Поляченко А. Л. Разведочная ядерная геофизика. Справочник геофизика. М. : Недра, 1986. 432 с.
3. Ларионов В. В., Резанов Р. А. Ядерная геофизика и радиометрическая разведка. М. : Недра, 1988. 325 с.
4. Милютин А. Г. Разведка и геолого-экономическая оценка месторождений полезных ископаемых. М. : МГОУ, 2004. URL: https://www.google.com.ua/url?sa=t&rc=j&q=&esrc=s&source=web&cd=3&cad=rja&uact=8&ved=0ahUK Ewj4gqXrx dXTAhVFECw KHZpRCTQQFggxMAI&url=http%3A%2F%2Fgeoprotection.narod.ru%2Fgenesis%2Fprospecting.pdf&usq=AFQjCNHz17952rEYNLaVnfR12oOJc0if0A&sig2=PYqo9PbWpjML5nJCoBl_qw
5. Чернобыль: радиоактивное загрязнение природных сред / Под ред. Ю. А. Израэля. Л. : Гидрометиздат, 1990. 296 с.
6. Чернобыльская катастрофа / Под ред. В.Г. Барьяхтара. К. : Наук. думка, 1995. 560 с.
7. Григорян С. В., Соловов А. П., Кузин М. Ф. Инструкция по геохимическим методам поисков рудных месторождений. М. : Недра, 1983. 191 с.
8. Родионов А. Р., Коган Р. И., Голубева В. А. и др. Справочник по математическим методам в геологии. М. : Наука, 1987. 334 с.
9. Ткачев Ю. А., Юдович Я. Э. Статистическая обработка геохимических данных. Методы и проблемы. Л. : Наука, 1975. 233 с.
10. Усиков Ю. Т. Достоверность геологоразведочной информации. М. : Недра, 1988. 120 с.
11. Хомутинин Ю. В., Кашпаров В. А., Жебровская Е. И. Оптимизация отбора и измерений проб при радиоэкологическом мониторинге. К. : ВІПОЛ, 2001. 160 с.
12. Хомутинин Ю. В. Оптимизация пробоотбора при оценке плотности радиоактивных выпадений. *Зб. наук. праць Інституту ядерних досліджень*. 2003. № 1(9). С. 145—155.
13. Хомутинин Ю. В., Левчук С. Є. Павлюченко В. В. Оптимізація відбору проб ґрунту при картуванні щільності радіоактивних випадань. *Вісник Житомирського університету*. 2016. № 1(55), т. 3. С. 74—84.
14. Свешников А. А. Прикладные методы теории случайных функций. М. : Наука, 1968. 463 с.
15. Крамер Г., Лидбеттер М. Стационарные случайные процессы. М. : Мир, 1969. 399 с.
16. Вентцель Е. С., Овчаров Л. А. Теория случайных процессов и ее инженерные приложения. М. : Наука, 1991. 384 с.
17. Коган Р. И. Интервальные оценки в геологических исследованиях : Справ. пособие. М. : Недра, 1986. 160 с.
18. Kashparov, V., Levchuk, S., Zhurba, M., Protsak, V., Khomutinin, Yu., Beresford, N.A., Chaplov, J.S. (2017), "Spatial datasets of radionuclide contamination in the Ukrainian Chernobyl Exclusion zone", NERC Environmental Information Data Centre. URL: <https://doi.org/10.5285/782ec845-2135-4698-8881-b38823e533bf>

References

1. Mikhailov, A. E. (1984), Structural geology and geological mapping [Strukturalnaya geologiya i geologicheskoye kartirovaniye], M., Nedra, 464 p.

2. Kuznetsov, O. L., Polyachenko, A. L. (1986), Exploratory nuclear geophysics. Reference book of geophysics [Razvedchnaya yadernaya geofizika. Spravochnik geofizika], M., Nedra, 432 p.

3. Larionov, V. V., Rezanov, R.-A. (1988), Nuclear Geophysics and radiometric prospecting [Yadernaya geofizika i radiometricheskaya razvedka], M., Nedra, 325 p.

4. Milyutin, A. G., (2004), "Exploration and geological and economic evaluation of mineral deposits" ["Razvedka i geologo-ekonomicheskaya otsenka mestorozhdeniy poleznykh iskopayemykh"], M., MGOU, available at: https://www.google.com.ua/url?sa=t&rct=j&q=&esrc=s&source=web&cd=3&cad=rja&uact=8&ved=0ahUKEwj4gqXrdXTAhVFECwKHZpRCTQQFggxMAI&url=http%3A%2F%2Fgeoprotection.narod.ru%2Fgenesis%2Fprospecting.pdf&usq=AFQjCNHz7952rEYNLaVnfR12oOJc0if0A&sig2=PYqo9PbWpjML5nJCoBl_qw

5. Israel, Yu. A., (1990), Chernobyl: radioactive contamination of natural environments [Chernobyl': radioaktivnoye zagryazneniye prirodnykh sred], L., Gidrometizdat, 296 p.

6. Baryakhtar, V. G., (1995), The Chernobyl disaster [Chernobyl'skaya katastrofa], Kiev, Naukova dumka, 560 p.

7. Grigoryan, S. V., Solovov, A. P., Kuzin M. F. (1983), Instruction on geochemical methods of prospecting for ore deposits [Instruktsiya po geokhimicheskim metodam poiskov rudnykh mestorozhdeniy], M., Nedra, 191 p.

8. Rodionov, A. R., Kogan, R. I., Golubeva, V. A., Smirnov, B. I., (1987), Handbook of mathematical methods in geologists [Spravochnik po matematicheskim metodam v geologii], M., Nauka, 334 p.

9. Tkachev, Yu. A., Yudovich, Ya. E., (1975), Statistical processing of geochemical data. Methods and problems [Statisticheskaya obrabotka geokhimicheskikh dannykh. Metody i problemy], L., Nauka, 233 p.

10. Usikov, Yu. T. (1988), Reliability of geological survey information [Dostovernost' geologorazvedochnoy informatsii], M., Nedra, 120 p.

11. Khomutinin, Yu. V., Kashparov, V. A., Zhebrovskaya, E. I. (2001), Optimization of sampling and measurement of samples during radioecological monitoring [Optimizatsiya otbora i izmereniy prob pri radioekologicheskoy monitoringe], Kiev, VIPOL, 160 p.

12. Khomutinin, Yu. V., (2003), "Optimization of sampling in assessing the density of radioactive fallout" Collection of scientific works of the Institute of Nuclear Research ["Optimizatsiya probotbora pri otsenke plotnosti radioaktivnykh vypadeniy" Zbirnyk naukovykh prats' Instytutu Yadernykh Doslidzhen'], Kiev, pp. 145–155.

13. Khomutinin, Yu. V., Levchuk, S. E. Pavlyuchenko, V. V. (2016), "Optimization of soil sampling when mapping the density of radioactive fallout" ["Optimizatsiya vidboru prob gruntu pry kartuvanni shchil'nosti radioaktivnykh vypad"], Kiev, pp. 145–155.

14. Svishnikov, A. A., (1968), Applied methods of the theory of random functions [Prikladnyye metody teorii sluchaynykh funktsiy], M., Nauka, 463 p.

15. Kramer, G., Lidbetter, M., (1969), Stationary random processes [Statsionarnyye sluchaynyye protsessy], M., Mir, 399 p.

16. Venttsel, E. S., Ovcharov, L. A., (1991), Theory of random processes and its engineering applications [Teoriya sluchaynykh protsessov i yeyo inzhenernyye prilozheniya], M., Nauka, 384 p.

17. Kogan, R. I., (1986), Interval estimates in geological studies: A reference book [Interval'nyye otsenki v geologicheskikh issledovaniyakh: Spravochnoye posobiye], M., Nedra, 160 p.

18. Kashparov, V., Levchuk, S., Zhurba, M., Protsak, V., Khomutinin, Yu., Beresford, N. A., Chaplov, J. S. (2017), "Spatial datasets of radionuclide contamination in the Ukrainian Chernobyl Exclusion zone", NERC Environmental Information Data Centre, available at: <https://doi.org/10.5285/782ec845-2135-4698-8881-b38823e533bf>

Ю. В. Хомути́н, О. С. Глуховський, В. П. Процак, В. А. Кашпаров, С. Е. Левчук, В. В. Павлюченко

Картографування плям радіоактивного забруднення

Запропоновано методологію та розроблено алгоритм картографування й оконтурювання плям радіоактивного забруднення території ^{137}Cs . В основу методології покладено принцип багатостадійності (послідовних наближень), що широко використовується в геологорозвідувальних роботах. При цьому щільність забруднення території ^{137}Cs у кожній точці розглядається як випадкова величина з логнормальним розподілом ймовірностей. Реалізація алгоритму базується на оптимізації кількості точок пробовідбору, необхідних для оцінки щільності забруднення ґрунту із заданою відносною похибкою, при виділенні плями забруднення. Результати тестування алгоритму підтвердили ефективність і стійкість його роботи, а також простоту практичного застосування. Запропонована методологія дає змогу істотно мінімізувати витрати на польові роботи з відбору проб ґрунту та визначення в них вмісту радіонуклідів.

Ключові слова: щільність радіоактивного забруднення, картографування радіоактивного забруднення, виділення і оконтурювання плям радіоактивного забруднення.

Y. Khomutinin, O. Glukhovsky, V. Protsak, V. Kashparov, S. Levchuk, V. Pavliuchenko

Cartographing of "spots" of radioactive pollution

The methodology was proposed and the algorithm was developed for mapping and delineating the "spots" of radioactive contamination territory by the ^{137}Cs . The methodology is based on the principle of multi-stage (successive approximations) widely used in geological surveys. Herewith, the ^{137}Cs contamination density at each point is considered as a random variable with a lognormal probability distribution. The implementation of the algorithm is based on optimization of the number of sampling points necessary for estimating the density of soil contamination with a given relative error at the identification of a "spot" of contamination. The results of testing the algorithm confirmed the effectiveness and stability of its operation, as well as the simplicity of practical application. The proposed methodology makes it possible to substantially minimize the costs of field work for sampling soil and measuring the content of radionuclides in them.

Keywords: density of radioactive contamination, mapping of radioactive contamination, localization and delineation of "spots" of radioactive contamination.

Получено 13.11.2017.