

С.И. Спиридонов, В.В. Иванов, И.Е. Титов

СТАТИСТИЧЕСКОЕ ПРОГНОЗИРОВАНИЕ НАКОПЛЕНИЯ ^{137}Cs В ПРОДУКЦИИ РАСТЕНИЕВОДСТВА НА РАДИОАКТИВНО ЗАГРЯЗНЕННЫХ ТЕРРИТОРИЯХ

Всероссийский научно-исследовательский институт радиологии и агроэкологии, Обнинск

Контактное лицо: Сергей Иннокентьевич Спиридонов, e-mail: spiridonov.si@gmail.com

РЕФЕРАТ

Цель: Разработка статистических моделей для прогнозирования накопления ^{137}Cs в продукции растениеводства, параметризация моделей и прогностические оценки для территорий Брянской области, загрязненных ^{137}Cs в результате аварии на Чернобыльской АЭС.

Материал и методы: Обосновано использование вероятностного подхода для корректных прогностических оценок безопасности агропродукции, получаемой на радиоактивно загрязненных сельскохозяйственных землях. Разработаны аналитические модели в рамках вероятностного подхода для прогнозирования рисков радиоактивного загрязнения ^{137}Cs растениеводческой продукции, оценки допустимых уровней загрязнения пахотных земель и времени их естественной реабилитации.

Результаты: На основе статистического анализа данных радиоэкологического обследования установлено, что плотность загрязнения почв ^{137}Cs подчиняется логнормальному закону распределения с высоким уровнем значимости. Для хозяйств юго-западных районов Брянской области показано, что при соответствии средних значений содержания ^{137}Cs в растениеводческой продукции установленному нормативу, риски его превышения могут достигать 30 %. Это обусловлено вариабельностью плотностей загрязнения почвы ^{137}Cs и миграционных параметров. Представлены зависимости предельных плотностей загрязнения почв ^{137}Cs от риска превышения нормативов содержания этого радионуклидов в продукции. Время естественной реабилитации пахотных сельскохозяйственных угодий при заданном риске для продукции 10 % может превышать 30 лет.

Заключение: Применение вероятностных методов для прогнозирования последствий загрязнения сельскохозяйственных земель ^{137}Cs дает возможность скорректировать практические рекомендации, выработанные на основе детерминированного подхода. Результаты прогностических расчетов являются основой планирования и оценки возможности возвращения территорий, загрязненных ^{137}Cs , в хозяйственное использование. Разработанные модели могут быть использованы при развитии систем поддержки принятия решений по реабилитации сельскохозяйственных земель, подвергшихся чернобыльским выпадениям.

Ключевые слова: радиоактивное загрязнение, сельхозугодия, продукция растениеводства, статистические модели, риск превышения норматива, логнормальное распределение, Брянская область, юго-западные районы

Для цитирования: Спиридонов С.И., Иванов В.В., Титов И.Е. Статистическое прогнозирование накопления ^{137}Cs в продукции растениеводства на радиоактивно загрязненных территориях // Медицинская радиология и радиационная безопасность. 2022. Т. 67. № 2. С. 10-17. DOI: 10.33266/1024-6177-2022-67-2-10-17

S.I. Spiridonov, V.V. Ivanov, I.E. Titov

STATISTICAL FORECASTING OF ^{137}Cs ACCUMULATION IN CROP PRODUCTION ON RADIOACTIVELY CONTAMINATED LANDS

Russian Institute of Radiology and Agroecology, Obninsk, Russia

Contact person: S.I. Spiridonov, e-mail: spiridonov.si@gmail.com

ABSTRACT

Purpose: The development of statistical models for forecasting the accumulation of ^{137}Cs in crop production, model parameterisation and prognostic estimates for the territories of the Bryansk region contaminated with ^{137}Cs because of the Chernobyl accident.

Material and methods: The use of a probabilistic approach for correct predictive assessments of the safety of agricultural products from radioactively contaminated agricultural lands has been substantiated. Analytical models were developed in the framework of a probabilistic approach to predict the risks of radioactive contamination of crop products, to assess the permissible levels of contamination of arable lands and the time of their natural remediation.

Results: Based on a statistical analysis of radioecological survey data, it was established that the ^{137}Cs contamination density of the soil follows a lognormal distribution law with a high level of significance. For farms in the south-western districts of the Bryansk region, it was shown that, if the average values of ^{137}Cs content in crop production corresponded to the established standard, the risks of its excess could reach 30 %. This is due to the variability of ^{137}Cs soil contamination densities and migration parameters. The dependences of limiting soil contamination densities of ^{137}Cs on the risk of exceeding the standards (RES) of the content of this radionuclide in products were presented. The time of natural rehabilitation of arable agricultural land with a given risk for products of 10 % can exceed 30 years.

Conclusion: The application of probabilistic methods to predict the consequences of ^{137}Cs contamination of agricultural lands makes it possible to correct practical recommendations developed on the basis of a deterministic approach. The results of prognostic calculations are the basis for planning and evaluating the possibility of returning territories contaminated by ^{137}Cs to economic use. The developed methodology and models can be used in the development of decision support systems for the remediation of agricultural lands exposed to radioactive fallout.

Keywords: *radioactively contamination agricultural lands, crop production, statistical models, risk of exceeding the standard, lognormal distribution, the Bryansk region, south-western districts*

For citation: Spiridonov SI, Ivanov VV, Titov IE. Statistical forecasting of ^{137}Cs accumulation in crop production on radioactively contaminated lands. *Medical Radiology and Radiation Safety*. 2022;67(2):10-17. (In Russian) DOI: 10.33266/1024-6177-2022-67-2-10-17

Введение

В результате аварии на Чернобыльской АЭС радиоактивному загрязнению подверглись обширные территории России, Белоруссии и Украины. Значительную площадь на этих территориях занимают земли сельскохозяйственного назначения. В России ^{137}Cs было загрязнено более 2 млн га сельскохозяйственных угодий, в Белоруссии – 1,4 млн га, на Украине – 0,9 млн. га [1]. Перевод пострадавшего населения и территорий, подвергшихся радиоактивному загрязнению, к условиям нормальной жизнедеятельности возможен при одновременном соблюдении трех радиологических критериев. К ним относятся: установленные национальные пределы средних годовых эффективных доз облучения населения, предельные плотности загрязнения территории чернобыльскими радионуклидами (прежде всего ^{137}Cs) и их допустимое содержание в продукции [2]. В этих условиях важное значение приобретает проблема прогнозирования накопления ^{137}Cs в сельскохозяйственной продукции. Результаты прогностических расчетов являются основой планирования и оценки возможности возвращения пострадавших территорий в хозяйственное использование.

К настоящему времени накоплен большой объем информации, характеризующей плотность загрязнения ^{137}Cs сельскохозяйственных угодий юго-западных районов Брянской области, подвергшихся чернобыльским выпадениям [2]. Выполнена комплексная паспортизация сельскохозяйственных предприятий, расположенных в этих районах [3]. Прогнозирование радиологической обстановки с использованием указанного информационного массива выполняется, как правило, на основе детерминированного подхода [1–4]. Прогнозируемыми показателями в этом случае являются средние (по хозяйствам и районам) значения плотностей загрязнения территорий ^{137}Cs и его содержания в продукции, которые сопоставляются с нормативами [5].

Следует подчеркнуть, что плотности загрязнения сельскохозяйственных земель ^{137}Cs и параметры миграции этого радионуклида обладают существенной вариативностью [6–9]. По этой причине расчет содержания ^{137}Cs в продукции на основе детерминированного подхода может привести к недооценке уровня ее загрязнения. Так, расчеты на основе данных, представляющих средние плотности загрязнения ^{137}Cs полей тестового хозяйства “Увелье” Красногорского района Брянской области, показали, что риск превышения норматива (РПН) содержания ^{137}Cs в зерне составляет 26 % [10]. При этом значение средней по хозяйству концентрации этого радионуклида в зерне не превышает установленный норматив 60 Бк/кг [6].

Оценка РПН содержания ^{137}Cs в сельскохозяйственной продукции с учетом вариативности параметров миграции (коэффициентов накопления [8, 9]) также продемонстрировала существенное различие результатов, полученных детерминированным и вероятностным методами. Показано, что значения предельных плотностей загрязнения почвы, рассчитанные на основе вероятностного подхода исходя из заданного риска загрязнения зерновой продукции 5 %, в 4–5 раз превышают значения рассматриваемого показателя, оцененного с использованием среднеарифметического и среднегеометрического значений коэффициента накопления [11, 12].

Эффективность агрохимических реабилитационных мероприятий на сельскохозяйственных угодьях (кратность снижения накопления ^{137}Cs в растениях) не превышает 1,5–3 раз [13]. Таким образом, адекватное прогнозирование поступления ^{137}Cs в продукцию с учетом вариативности плотностей загрязнения сельскохозяйственных земель и миграционных параметров является необходимым условием выработки и обоснования реабилитационных мероприятий на территориях, подвергшихся радиоактивным выпадениям.

Целью работы является разработка статистических моделей для прогнозирования накопления ^{137}Cs в продукции растениеводства, параметризация моделей и прогностические оценки для территорий Брянской области, загрязненных ^{137}Cs в результате аварии на Чернобыльской АЭС.

Методический подход и расчетный инструментарий

Во введении к статье обоснована целесообразность вероятностного подхода для корректных прогностических оценок загрязнения продукции, получаемой на сельскохозяйственных землях, подвергшихся выпадениям ^{137}Cs . В рамках обозначенного направления исследований можно сформулировать три взаимосвязанные задачи:

- прогнозирование (РПН) содержания ^{137}Cs в растениеводческой продукции, получаемой на радиоактивно загрязненной территории (“прямая задача”);
- оценка предельных уровней загрязнения ^{137}Cs сельскохозяйственных земель с точки зрения соблюдения заданных (допустимых) РПН (“обратная задача”);
- оценка времени естественной реабилитации сельскохозяйственных угодий, по истечении которого достигаются допустимые РПН для агропродукции.

Решение этих задач возможно при наличии расчетного инструментария – статистических моделей, параметризованных для рассматриваемых радиоактивно загрязненных территорий. Важный этап разработки моделей – идентификация законов распределения двух опорных показателей – плотности загрязнения почв и параметров миграции радионуклидов в системе почва – растения.

Анализ данных мониторинга территорий, подвергшихся радиоактивным выпадениям в результате атмосферных выбросов при радиационных авариях, позволяет утверждать, что распределение радионуклидов, осевших на земную поверхность, имеет статистически универсальный характер и подчиняется логнормальному закону [14]. Так, распределения плотности загрязнения (кБк/м²) долгоживущими радионуклидами (^{90}Sr , ^{137}Cs , ^{238}Pu , $^{239+240}\text{Pu}$, ^{241}Am) более чем 60 участков, подвергшихся чернобыльским выпадениям, лишь в одном случае не являются логнормальными [6]. Содержание радионуклидов в нерекультивированной почве (Бк/кг) для всех полученных данных с большим количеством выборок подчиняется, без исключения, логнормальной статистике [6].

Это подтверждается результатами исследований на “безградиентных” участках в 30-км зоне Чернобыльской АЭС, загрязненных топливной компонентой выпадений, и на участках за пределами 30-км зоны на смежных

территориях [7]. Установлено, что плотность загрязнения почвы ^{137}Cs и его удельное содержание в растениях удовлетворительно описывается логнормальным законом распределения вероятностей.

Следует подчеркнуть, что указанная закономерность соблюдается вне зависимости от размера территории, загрязненной после аварии на Чернобыльской АЭС. Так, в работе [15] логнормальная статистика плотности загрязнения и удельной активности ^{137}Cs в почве обоснована для участков различной площади – от нескольких кв.м до 5400 км². Аналогичные результаты получены на основе статистической обработки данных, полученных после катастрофы на японской АЭС “Фукусима”. Параметры логнормального распределения плотности загрязнения ^{137}Cs оценены как для небольших участков, так и для значительных по размерам территорий [16].

На основе анализа литературных данных [6, 7, 14–16] можно утверждать, что плотность загрязнения ^{137}Cs почв сельскохозяйственных угодий Брянской области является случайной величиной и подчиняется логнормальному закону распределения. Параметры распределения могут быть определены для различных по площади территорий в иерархической структуре элементарный участок – поле – хозяйство – район.

В первые годы после аварии на Чернобыльской АЭС предложен подход, согласно которому уровни загрязнения сельскохозяйственных угодий и параметры переноса радионуклидов рассматриваются как случайные величины [17]. При этом допускаются различные виды вероятностных распределений (равномерное, нормальное, логнормальное). Полновесная реализация подхода возможна при наличии достаточного для статистического анализа объема эмпирических данных, включая представительные выборки рассматриваемых показателей для каждого поля в составе хозяйств. Получение такого информационного массива для обширных сельскохозяйственных угодий юго-западных районов Брянской области, загрязненных в результате чернобыльских выпадений, представляется трудоемким и затратным.

В результате радиоэкологического обследования рассматриваемых территорий к настоящему времени накоплена информация по плотностям загрязнения почв ^{137}Cs [18]. Минимальными структурными единицами являются элементарные участки площадью (на пахотных почвах) 5–25 га, для которых формировались объединенные пробы. Таким образом, для каждого участка представлено одно среднее значение плотности загрязнения. Статистическая обработка данных, полученных в ходе радиоэкологического обследования юго-западных районов Брянской области в 2009 г. [18], показала, что плотность загрязнения ^{137}Cs пахотных угодий A_s (кБк/м²) подчиняется логнормальному закону распределения $\ln(\mu_s, \sigma_s)$ (рис. 1) с высоким уровнем значимости 0,01 (табл. 1).

Основной почвенной характеристикой, определяющей уровень накопления радионуклидов в сельскохозяйственных растениях, является механический состав почв [8, 9]. Плотность загрязнения ^{137}Cs для почв различного механического состава также подчиняется логнормальному закону с параметрами μ_s и σ_s при уровне значимости 0,01, за исключением органических почв в силу малой выборки данных (табл. 1). Величина логарифма величины A_s описывается нормальным распределением с параметрами μ_s и σ_s . На рис. 2 представлены частотные распределения $\ln(A_s)$ для супесчаных и суглинистых почв, наиболее

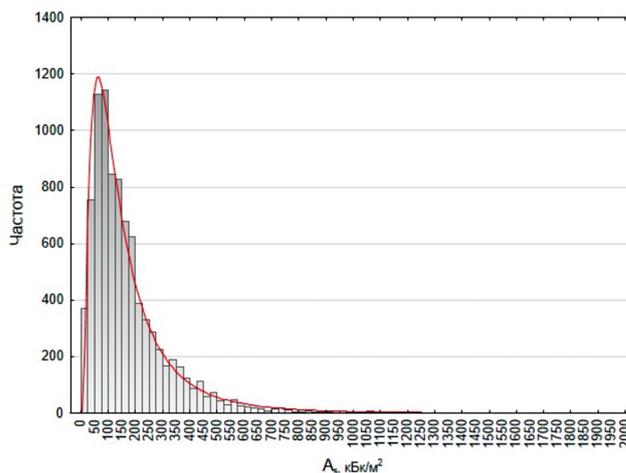


Рис. 1. Частотное распределение плотности загрязнения ^{137}Cs пахотных почв юго-западных районов Брянской области

Fig. 1. Frequency distribution of the ^{137}Cs contamination density of arable soils in the southwestern districts of the Bryansk region

Таблица 1

Статистические параметры логнормального распределения плотности загрязнения ^{137}Cs почв юго-западных районов Брянской области

Table 1

Statistical parameters of the lognormal distribution of the ^{137}Cs contamination density in soils in the southwestern districts of the Bryansk region

Группа почв	μ_s	σ_s	Размер выборки	Уровень значимости
Песчаная	5,17	0,551	398	0,01
Супесчаная	4,97	0,658	5354	0,01
Суглинистая	4,80	0,736	3158	0,01
Органическая	5,29	0,339	9	статистически не значимо
Все группы почв	4,92	0,684	8919	0,01

распространенных в юго-западных районах Брянской области.

Значения параметра σ_s (табл. 1) характеризуют дисперсию радиоактивного загрязнения пахотных почв на “макроуровне” и могут использоваться для статистического прогнозирования на уровне районов и хозяйств. Анализ литературных данных [16] для территорий, загрязненных ^{137}Cs в результате аварии на АЭС “Фукусима”, показал, что средняя величина σ_s (0,589) сопоставима со значениями этого параметра для почв юго-западных районов Брянской области.

Следует подчеркнуть, что для небольших участков загрязненной территории значение σ_s может принимать меньшие значения. Так, средняя величина σ_s для участков с площадью от нескольких десятков кв. м до 34 км², согласно данным [15], составляет 0,346. Эта величина близка к оценке 0,310 для безградиентных участков, загрязненных ^{137}Cs , в ближней зоне Чернобыльской АЭС [7]. Значения σ_s , представленные в табл. 1, можно использовать для отдельных элементарных участков и полей в рамках консервативной оценки. Прогностические оценки с учетом дисперсии плотностей загрязнений почвы позволяют оценить РПН для продукции, в отличие от расчетов на основе детерминистического подхода с использованием средних значений A_s .

В условиях квазистационарной ситуации в долгосрочный период после радиоактивных выпадений в качестве миграционных параметров рассматриваются коэффициенты накопления долгоживущих радионуклидов в сельскохозяйственных растениях. Коэффициент

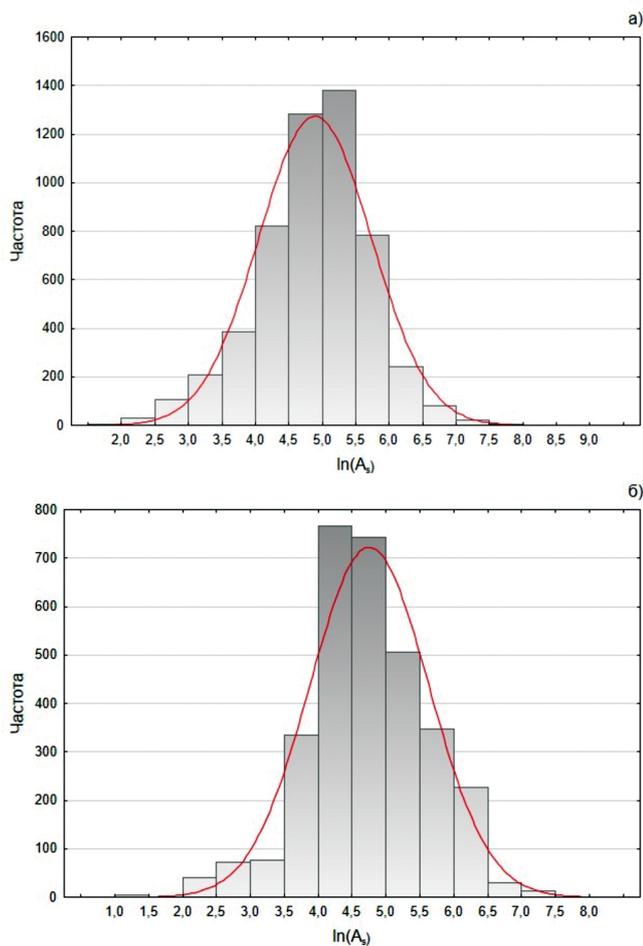


Рис. 2. Частотное распределение $\ln(A_s)$ для супесчаных (а) и суглинистых (б) пахотных почв юго-западных районов Брянской области

Fig. 2. Frequency distribution $\ln(A_s)$ for sandy loam (a) and loamy (b) arable soils in the southwestern districts of the Bryansk region

накопления ^{137}Cs K_H , так же как и плотность загрязнения A_s , следует полагать случайной величиной, аппроксимируемой логнормальным распределением $\ln(\mu_k, \sigma_k)$ [7–9, 19]. В документах МАГАТЭ [8, 9], носящих рекомендательный характер, величины K_H для различных радионуклидов, растений и групп почв приводятся в виде набора характеристик, к которым относятся средние геометрические значения (GM) и стандартные отклонения логнормальных распределений (GSD). На основе этих данных для ^{137}Cs рассчитаны μ_k и σ_k – параметры нормального распределения логарифма величины K_H .

На основе вышеизложенных представлений разработаны статистические модели [20], использованные для радиоэкологической оценки кормовых угодий юго-западных районов Брянской области [21].

Показателем накопления ^{137}Cs в растениеводческой продукции, полученной на загрязненной территории, является удельная активность C_p :

$$C_p = \lambda_0 K_n A_s \quad (1)$$

где A_s – плотность загрязнения территории ^{137}Cs , $\text{кБк}/\text{м}^2$; K_n – коэффициент накопления ^{137}Cs ; C_p – концентрация ^{137}Cs в продукции, $\text{Бк}/\text{кг}$, λ_0 – параметр, зависящий от толщины корнеобитаемого слоя и плотности почвы, $\text{м}^2/\text{кг}$.

В силу принятых положений C_p является случайной величиной, принадлежащей логнормальному распре-

делению $\ln(\mu_c, \sigma_c^2)$. Его параметры определяются следующим образом: $\mu_c = \mu_s + \mu_k$, а $\sigma_c^2 = \sigma_s^2 + \sigma_k^2$. Используя эти параметры можно получить выражение для среднего значения загрязненности продукции в зависимости от времени:

$$\langle C_p(t) \rangle = \lambda_0 e^{\mu_c + 0,5 \sigma_c^2 - at} = \langle C_p(0) \rangle e^{-at} \quad (2)$$

Величины, рассчитанные с помощью уравнения (2), должны совпадать величинами, которые можно получить на основе упрощенного детерминированного подхода. Выражение (2) дает возможность сравнивать на этапе верификации показатели загрязнения продукции, вычисленные в рамках детерминированного и вероятностного подходов.

Статистической характеристикой загрязнения продукции растениеводства ^{137}Cs является величина риска превышения норматива (РПН), которая равна доле продукции с содержанием ^{137}Cs , превышающим установленный санитарно-гигиенический норматив A ($\text{Бк}/\text{кг}$) [5]. Контроль величины РПН позволит обеспечить продовольственную безопасность продукции, производимой на загрязненных территориях. Фактическое значение РПН может быть оценено на основе обработки выборки эмпирических данных, характеризующих содержание ^{137}Cs в растениях. Следует отметить, что такая процедура может оказаться слишком затратной, либо не всегда возможной. В этих условиях необходим расчетный инструмент для оценки и прогнозирования РПН на основе статистических характеристик радиоактивного загрязнения сельскохозяйственных угодий и миграционных параметров.

Для решения сформулированной выше “прямой задачи” – расчета вероятности того, что содержание ^{137}Cs в растениеводческой продукции превышает норматив A , получено аналитическое выражение [20]:

$$R = \frac{1}{2} \{1 - \text{erf}[(\ln(\frac{A}{\lambda_0}) - \mu_c) / (\sigma_c \sqrt{2})]\} \quad (3)$$

Следует отметить, что при равенстве A медианному значению распределения C_p , то есть когда $A = \lambda_0 e^{\mu_c}$, величина РПН равна 0,5. Вследствие сохранения параметра σ_c логнормального распределения случайной величины C_p в процессе радиоактивного распада зависимость РПН для продукции растениеводства от времени имеет следующий вид:

$$R(t) = \frac{1}{2} \{1 - \text{erf}[(\ln(\frac{A}{\lambda_0}) - \mu_c + at) / (\sigma_c \sqrt{2})]\} \quad (4)$$

Обращая соотношение (3) относительно μ_c , и выделяя параметр μ_s , получим выражение для вычисления предельно допустимой плотности загрязнения пахотных земель ^{137}Cs , которая функционально связана с нормативом содержания этого радионуклида в продукции (A) и риском превышения норматива (R):

$$\mu_s = \ln(\frac{A}{\lambda_0}) - \mu_k - \sigma_c \sqrt{2} \text{erf}^{-1}(1 - 2R) \quad (5)$$

Выражение для расчета средней предельной плотности загрязнения ^{137}Cs территории A_R , на которой можно производить продукцию растениеводства с РПН, не превышающим величины R , имеет следующий вид [20]:

$$A_R = e^{\ln(\frac{A}{\lambda_0}) - \mu_k + 0,5 \sigma_c^2 - \sigma_c \sqrt{2} \text{erf}^{-1}(1 - 2R)} \quad (6)$$

Выражение (6) представляет в аналитическом виде статистическое решение “обратной задачи” – опреде-

ления допустимых уровней загрязнения сельскохозяйственных земель с точки зрения получения нормативно пригодной продукции растениеводства.

На основе уравнения (4) получим выражение для оценки времени T_R , по истечении которого за счет радиоактивного распада загрязняющего радионуклида достигаются допустимые РПН для продукции растениеводства [20]:

$$T_R = \frac{1}{\alpha} \left[\mu_c + \sigma_c \sqrt{2} \operatorname{erf}^{-1} (1 - 2R) - \ln \left(\frac{A}{\lambda_0} \right) \right]. \quad (7)$$

Выражение (7) является аналитической формой статистического решения третьей сформулированной выше задачи статистического прогнозирования, касающейся оценки времени естественной реабилитации пахотных земель.

Разработанные аналитические модели могут использоваться для расчетов на различных уровнях административно-территориальной организации “поле – хозяйство – район” при наличии соответствующих значений статистических параметров. Следует подчеркнуть, что для полей, на которых применялись защитные мероприятия, значения статистических характеристик коэффициента накопления могут существенно отличаться от рекомендованных МАГАТЭ [8, 9]. Модели пригодны для параметризации не только для ^{137}Cs , но и для других радионуклидов, загрязняющих сельскохозяйственные земли в результате радиоактивных выбросов.

Расчетные оценки и обсуждение

Разработанные модели применены для оценки риска превышения норматива содержания ^{137}Cs в продукции растениеводства, получаемой на радиоактивно загрязненных сельскохозяйственных землях юго-западных районов Брянской области (табл. 2). Статистические параметры, характеризующие плотность загрязнения почвы, оценены в рамках “макроподхода” с использованием данных радиэкологического обследования на уровне районов, проведенного в 2009 г. [18]. Значение μ_s рассчитано на 2019 г. по формуле:

$$\mu_s(t) = \mu_s(0) - \alpha t, \quad (8)$$

где для ^{137}Cs величина $\alpha = 0,023 \text{ лет}^{-1}$ (период полураспада $T_{1/2} = 30,17 \text{ лет}$).

Следует подчеркнуть, что параметр σ_s характеризующий дисперсию радиоактивного загрязнения почв, не меняется с течением времени для определенной территории, в отличие от величины μ_s , снижающейся в результате радиоактивного распада.

Значения риска превышения норматива для зерновой продукции варьируют в широком диапазоне, достигая максимальных значений для всех групп почв Новозыбковского района (21–32 %). Минимальные величины РПН характерны для Климовского района (4–9 %). Высокое значение РПН (37 %) наблюдается для загрязненного участка пашни с песчаными почвами в Гордеевском районе, однако площадь этого участка незначительна (1,5 % пахотных земель). Снижение РПН в последовательности песчаные – супесчаные – суглинистые почвы обусловлено снижением значений GM и AM миграционного параметра K_n в указанной последовательности [8, 9].

Анализ результатов табл. 2 показывает, что для супесчаных и суглинистых почв, характерных для пахотных земель юго-западных районов Брянской области, риск превышения норматива содержания ^{137}Cs в зерно-

Таблица 2

Риск превышения норматива содержания ^{137}Cs в зерновой продукции, получаемой на территории юго-западных районов Брянской области

Table 2

The risk of exceeding the ^{137}Cs content standard in grain products produced in the south-western districts of the Bryansk region

Район	Группа почв	Доля группы почв в составе пашни, %	РПН, %
Гордеевский	Песчаная	1,5	37
	Супесчаная	76	18
	Суглинистая	22,5	20
Злынковский	Песчаная	1,7	23
	Супесчаная	84	25
	Суглинистая	14,3	11
Клиновский	Песчаная	1,5	18
	Супесчаная	57,6	15
	Суглинистая	40,9	6
Климовский	Песчаная	10,4	9
	Супесчаная	36,3	8
	Суглинистая	53,3	4
Красногорский	Супесчаная	74	19
	Суглинистая	26,0	9
Новозыбковский	Песчаная	8,7	32
	Супесчаная	45,6	27
	Суглинистая	45,7	21

вой продукции в ряде случаев превышает 10 %. В Новозыбковском и Злынковском районах РПН для наиболее распространенных супесчаных почв превышает 20 %.

В то же время, среднее содержание ^{137}Cs в зерновой продукции $\langle C_p \rangle$, рассчитанное по формуле (2) для различных групп почв юго-западных районов Брянской области, не превышает нормативное значение 60 Бк/кг [5]. Средневзвешенная с учетом вкладов отдельных групп почв на рассматриваемой территории величина $\langle C_p \rangle$ для зерна составила 35 Бк/кг. Значение этого показателя, полученное в ходе проведенного в 2018 г. радиэкологического обследования, равно 28 Бк/кг [22]. Возможная причина расхождения расчетного и эмпирического значения $\langle C_p \rangle$ состоит в том, что полученные при обследовании выборки не вполне представляют генеральную совокупность данных.

Таким образом, при соответствии средних значений содержания ^{137}Cs в зерновой продукции установленному нормативу [5] значения РПН могут превышать 10 и даже 20 %. Это связано с вариабельностью плотностей загрязнения ^{137}Cs пахотных угодий юго-западных районов Брянской области. Так, согласно данным последнего тура радиэкологического обследования, минимальное значение этого показателя составляет 41, а максимальное – 1285 кБк/м² [21]. Для Злынковского района минимальная и максимальная величины плотности загрязнения пашни ^{137}Cs равны 7 и 2638 кБк/м² соответственно. Вторая причина формирования значимых величин РПН – существенная вариабельность параметра миграции K_n [8, 9].

При планировании мероприятий на загрязненных сельскохозяйственных землях важны результаты оценки предельных уровней загрязнения почв, обеспечивающих соблюдение допустимых РПН для продукции (“обратная задача”). Такие расчеты выполнены на основе соотношения (6) с использованием данных [18]. В качестве примера на рис. 3–4 представлены зависимости предельных плотностей загрязнения ^{137}Cs почв Новозыбковского района (A_R) от РПН для зерновых и зернобобовых культур. Величина A_R при заданном риске загрязнения про-

дукции растениеводства для суглинистых почв выше, чем для супесчаных почв. Это обусловлено различием в коэффициентах накопления ^{137}Cs для рассматриваемых почвенных групп. Так, среднегеометрическое значение (GM) K_n для зернобобовых культур на супесчаных почвах равно 0,087, а на суглинистых – 0,02 [8, 9].

На основе уравнения (7) оценено время естественной реабилитации сельскохозяйственных угодий (T_R), по истечении которого будут соблюдаться допустимые риски превышения норматива для зерновой продукции. Так, для суглинистых почв СПК “Новозыбковское”, занимающих 74 % пахотных угодий этого хозяйства, РПН в зерновой продукции достигнет 10 % по прошествии 36 лет, а величина РПН 20 % – через 7 лет с настоящего момента времени. Для пахотных угодий СПК “Ольховское” (доля суглинистых почв – 100 %) с РПН 19 % в зерне величина этого показателя снизится до 10 % через 22 года.

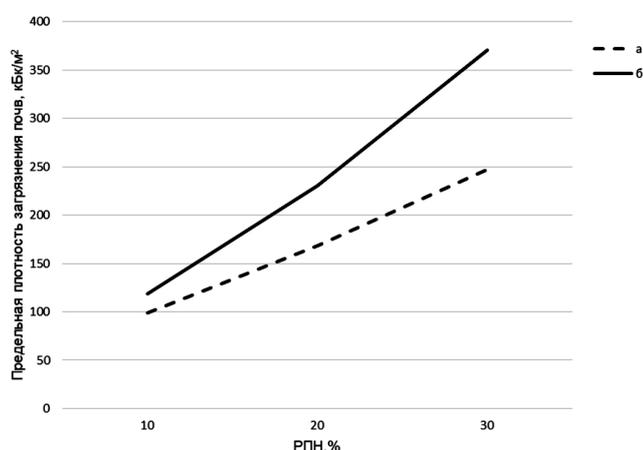


Рис. 3. Зависимость предельной плотности загрязнения ^{137}Cs почв Новозыбковского района от РПН для зерновых культур (а – супесчаные почвы; б – суглинистые почвы)

Fig. 3. Dependence of the limiting ^{137}Cs contamination density in soils of the Novozybkovsky district on the RES for grain crops (a – sandy loam soils; b – loamy soils)

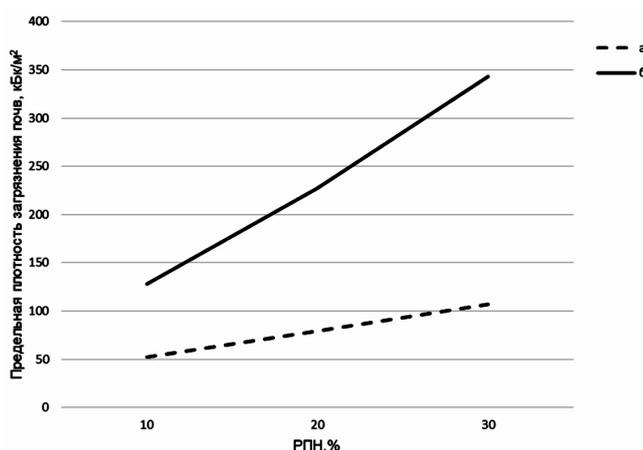


Рис. 4. Зависимость предельной плотности загрязнения ^{137}Cs почв Новозыбковского района от РПН для зернобобовых культур (а – супесчаные почвы; б – суглинистые почвы)

Fig. 4 Dependence of the limiting ^{137}Cs contamination density in soils of the Novozybkovsky district on the RES for leguminous crops (a – sandy loam soils; b – loamy soils)

Заключение

Выполнен статистический анализ данных радиоэкологического обследования сельскохозяйственных земель юго-западных районов Брянской области, подвергшихся чернобыльским выпадениям. Установлено, что плотность загрязнения почв ^{137}Cs подчиняется логнормальному закону распределения с уровнем значимости 0,01 для песчаных, супесчаных и суглинистых почв.

По результатам статистического анализа разработаны и параметризованы модели для прогнозирования рисков загрязнения ^{137}Cs продукции растениеводства, оценки предельных уровней загрязнения ^{137}Cs пахотных земель и времени их естественной реабилитации на основе заданных рисков для продукции. При наличии представительных эмпирических данных модели могут быть параметризованы для административно-хозяйственных образований различного уровня агрегации: поле – хозяйство – район.

Рассчитанные значения риска превышения норматива содержания ^{137}Cs в зерновой продукции достигают максимальных значений для сельскохозяйственных угодий Новозыбковского района (21–32 %). Минимальные величины этого показателя зафиксированы для Климовского района (4–9 %). Следует подчеркнуть, что при соответствии средних значений содержания ^{137}Cs в зерновой продукции нормативному показателю значения РПН могут превышать 20 %. Установлены зависимости предельных плотностей загрязнения ^{137}Cs почв юго-западных районов Брянской области от РПН для зерновых и зернобобовых культур. При всех значениях РПН предельные плотности загрязнения ^{137}Cs для суглинистых почв существенно выше, чем для супесчаных почв. Оценено время естественной реабилитации сельскохозяйственных угодий, по истечении которого будут соблюдаться допустимые риски превышения норматива содержания ^{137}Cs в растениеводческой продукции. Этот показатель варьирует в широком диапазоне, в зависимости от параметров распределений плотности загрязнения ^{137}Cs пахотных земель и коэффициента накопления ^{137}Cs в растениях для различных групп почв. При заданном риске для продукции 10 % время естественной реабилитации пахотных угодий может превышать 30 лет.

Применение вероятностных методов для прогнозирования последствий радиоактивного загрязнения сельскохозяйственных угодий дает возможность скорректировать практические рекомендации, выработанные на основе детерминистского подхода. Разработанные модели могут являться компонентами систем поддержки принятия решений по реабилитации сельскохозяйственных земель. Универсальность логнормального закона распределения загрязнения почв и миграционных параметров позволяет использовать свойство мультипликативности при статистическом прогнозировании накопления радионуклидов в продукции растениеводства и животноводства. Для адекватной оценки безопасности агропродукции целесообразно обоснование величины приемлемого (допустимого) риска ее загрязнения с учетом радиологических, экономических и социальных аспектов.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

- Панов А.В., Санжарова Н.И., Шубина О.А., Гордиенко Е.В., Титов И.Е. Современное состояние и прогноз загрязнения ^{137}Cs сельскохозяйственных угодий Брянской, Калужской, орловской и Тульской областей, подвергшихся воздействию аварии на Чернобыльской АЭС // Радиация и риск. 2017. Т.26, № 3. С. 66-74.
- Радиоэкологические последствия аварии на Чернобыльской АЭС: биологические эффекты, миграция, реабилитация загрязненных территорий / Под ред. Санжаровой Н.И., Фесенко С.В. М.: РАН, 2018. 278 с.
- Шубина О.А., Титов И.Е., Кречетников В.В., Санжарова С.И. Итоги комплексной паспортизации сельскохозяйственных угодий Брянской области, загрязненных радионуклидами // Агрехимический вестник. 2017. № 3. С. 35-39.
- Кречетников В.В., Титов И.Е., Шубина О.А., Прудников П.В. Оценка текущей радиоэкологической обстановки на сельскохозяйственных угодьях Новозыбковского района Брянской области // Вестник Брянской государственной сельскохозяйственной академии. 2017. № 4. С. 25-30.
- Санитарно-эпидемиологические правила и нормативы. СанПиН 2.3.2.1078-01. 2002. 269 с.
- Grubich A. Statistical and Structural Properties of Radionuclide Deposition // European Researcher. 2014. V.73, № 4-2.
- Хомутинин Ю.В., Кашпаров В.А., Жебровская Е.И. Оптимизация отбора и измерений проб при радиоэкологическом мониторинге: Монография. Киев: УкрНИИСХР. 2001. 160 с.
- Quantification of Radionuclide Transfer in Terrestrial and Freshwater Environments for Radiological Assessments. Vienna: International Atomic Energy Agency, 2009. 625 p.
- Handbook of Parameter Values for Prediction of Radionuclide Transfer in Terrestrial and Freshwater Environments. Vienna: International Atomic Energy Agency, 2010. 208 p.
- Иванов В.В., Спиридонов С.И., Куртмулаева В.Э. Компьютерная программа для оценки эффективности реабилитационных мероприятий на сельскохозяйственных угодьях, подвергшихся радиоактивному загрязнению // Агрехимический вестник. 2016. № 2. С. 23-26.
- Спиридонов С.И., Иванов В.В. Вероятностная оценка накопления радионуклидов в сельскохозяйственной продукции и допустимых уровней радиоактивного загрязнения почв // Радиационная биология. Радиоэкология. 2013. Т.53, № 1. С. 95-103.
- Спиридонов С.И., Иванов В.В. Статистическое прогнозирование последствий радиоактивного загрязнения пастбищных сельскохозяйственных угодий // Радиационная биология. Радиоэкология. 2014. Т.54, № 6. С. 621-631.
- Сельскохозяйственная радиоэкология / Под ред. Алексанова Р.М., Корнеева Н.А. М.: Экология, 1991. 397 с.
- Daniels W.M., Higgins, N.A. Environmental Distribution and the Practical Utilisation of Detection Limited Environmental Measurement Data. NRPB-W13. 2002. ISBN 0 85951 484 6.
- Grubich A., Makarevich V.I., Zhukova O.M. Description of Spatial Patterns of Radionuclide Deposition by Lognormal Distribution and Hot Spots // Journal of Environmental Radioactivity. 2013. No. 126. P. 264-272.
- Mory A., Takahara S., Ishizaki A., Iijima M., Sanada Y., Munakata M. Assessment of Residual Doses to Population after Decontamination in Fukushima Prefecture // Journal of Environmental Radioactivity. 2017. No. 166. P. 74-82.
- Фесенко С.В., Черняева Л.Г., Санжарова Н.И., Алексахин Р.М. Вероятностный подход к прогнозированию радиоактивного загрязнения сельскохозяйственной продукции // Атомная энергия. 1993. Т.74, № 6. С. 507-512.
- Свидетельство о государственной регистрации № 2016620790 от 15.06.2016 "Единый реестр радиоактивно загрязненных сельскохозяйственных земель России и Беларуси". 2016.
- Yamamura K., Fujimura S., Ota T., Ishikawa T., Saito T., Arai Y., Shinano T. A Statistical Model for Estimating the Radioesium Transfer Factor from Soil to Brown Rice Using the Soil Exchangeable Potassium Content // Journal of Environmental Radioactivity. 2018. No. 195. P. 114-125.
- Иванов В.В., Спиридонов С.И. Статистическое прогнозирование накопления радионуклидов в растениях. Информационный ресурс <https://zenodo.org/record/2593433> (Дата обращения 14.03.2019).
- Спиридонов С.И., Иванов В.В., Титов И.Е., Нуштаева В.Э. Радиоэкологическая оценка кормовых сельскохозяйственных угодий Брянской области на основе комплекса статистических моделей // Радиация и риск. 2021. Т.30, № 2. С. 38-49.
- Панов А.В., Прудников П.В., Титов И.Е., Кречетников В.В., Ратников А.Н., Шубина О.А. Радиоэкологическая оценка сельскохозяйственных земель и продукции юго-западных районов Брянской области, загрязненных радионуклидами в результате аварии на Чернобыльской АЭС // Радиационная гигиена. 2019. Т.12, № 1. С. 25-35.

REFERENCES

- Panov A.V., Sanzharova N.I., Shubina O.A., Gordienko E.B., Titov I.E. Contamination of agricultural lands in Bryansk, Kaluga, Orel and Tula regions with ^{137}Cs as a result of the Chernobyl accident: current status and prognosis. *Radiatsiya i risk = Radiation and Risk*. 2017;26;3:66-74. (In Russian).
- Ed. Sanzharova N.I., Fesenko S.V. Radioekologicheskiye Posledstviya Avarii na Chernobylskoy AES: Biologicheskiye Effekty, Migratsiya, Reabilitatsiya Zagryaznennykh Territoriy = Radioecological Consequences of the Chernobyl Accident: Biological Effects, Migration, Rehabilitation of Contaminated Areas. Moscow, RAN Publ., 2018. 278 p. (In Russian).
- Shubina O.A., Titov I.YE., Krechetnikov V.V., Sanzharova S.I. Results of Complex Passportization of Agricultural Lands of South-Western Districts of the Bryansk Region Polluted by Radionuclides. *Agrokhimicheskij vestnik = Agrochemical Herald*. 2017;3:35-39 (In Russian).
- Krechetnikov V.V., Titov I.E., Shubina O.A., Prudnikov P.V. Assessment of current radioecological situation of agricultural lands in the Novozybkov district of the Bryansk region. *Vestnik Bryanskoj Gosudarstvennoj Selskokhozyaystvennoj Akademii = Bulletin of the Bryansk Agricultural Academy*. 2017;62;4:25-30 (In Russian).
- Sanitary and Epidemiological Regulations and Norms. SanPiN 2.3.2.1078-01. 2002. 269 p. (In Russian).
- Grubich A. Statistical and Structural Properties of Radionuclide Deposition. *European Researcher*. 2014;73;4-2.
- Khomutinin Yu.V., Kashparov V.A., Zhebrowskaya Ye.I. *Optimizatsiya Otбора i Izmereniy Prob Pri Radioekologicheskoy Monitoringe: Monografiya = Optimization of Sampling and Measurements During Radioecological Monitoring*. Monograph. Kiyev, UkrNIISKHR, 2001. 160 p. (In Russian).
- Quantification of Radionuclide Transfer in Terrestrial and Freshwater Environments for Radiological Assessments. Vienna, International Atomic Energy Agency, 2009. 625 p.
- Handbook of Parameter Values for Prediction of Radionuclide Transfer in Terrestrial and Freshwater Environments. Vienna, International Atomic Energy Agency, 2010. 208 p.
- Ivanov V.V., Spiridonov S.I., Kurtmulayeva V.E. Computer Code for Efficiency Assessment of Rehabilitation Actions on Radioactively Contaminated Agricultural Lands. *Agrokhimicheskij Vestnik = Agrochemical Herald*. 2016;2:23-26 (In Russian).
- Spiridonov C.I., Ivanov V.V. Probabilistic Assessment of Radionuclide Accumulation in Agricultural Products and Permissible Levels of Radioactive Contamination of Soils. *Radiatsionnaya Biologiya. Radioekologiya = Radiation Biology. Radioecology*. 2013;53;1:95-103 (In Russian).
- Spiridonov C.I., Ivanov V.V. Statistical Prediction of Consequences of Radioactive Contamination of Pasture Agricultural

- Lands. *Radiatsionnaya Biologiya. Radioekologiya* = Radiation Biology. Radioecology. 2014;54;6:621-631 (In Russian).
13. Ed. Aleksakhin R.M., Korneev N.A. *Selskokhozyaystvennaya radioekologiya* = Agricultural Radioecology. Moscow, Ekologiya Publ., 1991. 397 p. (In Russian).
 14. Daniels W.M., Higgins, N.A. Environmental Distribution and the Practical Utilisation of Detection Limited Environmental Measurement Data. NRPB-W13. 2002. ISBN 0 85951 484 6.
 15. Grubich A., Makarevich V.I., Zhukova O.M. Description of Spatial Patterns of Radionuclide Deposition by Lognormal Distribution and Hot Spots. *Journal of Environmental Radioactivity*. 2013;126:264-272.
 16. Mory A., Takahara S., Ishizaki A., Iijima M., Sanada Y., Munakata M. Assessment of Residual Doses to Population after Decontamination in Fukushima Prefecture. 2017;166:74-82.
 17. Fesenko S.F., Chernyaeva L.G., Sanzharova N.I., Aleksakhin R.M. Probabilistic Approach to the Prediction of Radioactive Contamination of Agricultural Production. *Atomnaya Energiya* = Atomic Energy. 1993;74;6:472-477 (In Russian).
 18. Certificate of State Registration № 2016620790 from 15.06.2016 «Unified Register of Radioactively Contaminated Agricultural Lands of Russia and Belarus». 2016. (In Russian).
 19. Yamamura K., Fujimura S., Ota T., Ishikawa T., Saito T., Arai Y., Shinano T. A Statistical Model for Estimating the Radiocesium Transfer Factor from Soil to Brown Rice Using the Soil Exchangeable Potassium Content. *Journal of Environmental Radioactivity*. 2018;195:114-125.
 20. Ivanov V.V., Spiridonov S.I., Statistical Prediction of Radionuclide Accumulation in Plant. URL: <https://zenodo.org/record/2593433> (Accessed 14 March, 2019) (In Russian).
 21. Spiridonov S.I., Ivanov V.V., Titov I.E., Nushtaeva V.E. Radioecological Assessment of Forage Agricultural Land in the Southwestern Areas of the Bryansk Region Based on a Set of Statistical Models. *Radiatsiya i Risk = Radiation and Risk*. 2021;30;2:38-49 (In Russian).
 22. Panov A.V., Prudnikov P.V., Titov I.E., Krechetnikov V.V., Ratinikov A.N., Shubina O.A. Radioecological Assessment of the Agricultural Lands and Products in South-West Districts of the Bryansk Region Contaminated by Radionuclides as the Result of the Chernobyl NPP Accident. *Radiatsionnaya Gygiena* = Radiation Hygiene. 2019;12;1:25-35 (In Russian).

Конфликт интересов. Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.
Финансирование. Исследование не имело спонсорской поддержки.
Участие авторов. Статья подготовлена с равным участием авторов.
Поступила: 30.11.2021. Принята к публикации: 30.03.2022.

Conflict of interest. The authors declare no conflict of interest.
Financing. The study had no sponsorship.
Contribution. Article was prepared with equal participation of the authors.
Article received: 30.11.2021. Accepted for publication: 30.03.2022.