DOI: 10.21870/0131-3878-2021-30-2-38-49

УДК 504.055:631.438(470.333)

Радиоэкологическая оценка кормовых сельскохозяйственных угодий юго-западных районов Брянской области на основе комплекса статистических моделей

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

ФГБНУ ВНИИ радиологии и агроэкологии, Обнинск

Выполнена радиоэкологическая оценка кормовых сельскохозяйственных угодий юго-западных районов Брянской области на основе данных, характеризующих вариабельность содержания радионуклидов в почве. Концентрация ^{137}Cs в продукции кормопроизводства рассчитывалась с учётом вероятностных распределений плотности загрязнения почвы ^{137}Cs и коэффициента накопления этого радионуклида в растениях. Обработка данных радиоэкологического обследования показала, что плотность загрязнения ^{137}Cs сельскохозяйственных земель юго-западных районов Брянской области подчиняется логнормальному закону. Для радиоэкологической оценки кормовых угодий использованы статистические модели и программные модули. Рассчитаны риски превышения нормативов содержания ^{137}Cs в продукции кормопроизводства, получаемой на почвах с различным механическим составом. Оценены предельные уровни загрязнения пастбищ и сенокосов ^{137}Cs , обеспечивающие соблюдение заданных рисков для продукции. Наименьшая предельная плотность загрязнения характерна для органических почв, которые можно считать «критичными» с точки зрения поступления ^{137}Cs в продукцию кормопроизводства. Выполнено прогнозирование времени реабилитации кормовых угодий юго-западных районов Брянской области при отсутствии защитных мероприятий на основе вероятностного подхода. Временной период, за который риск загрязнения кормовой продукции для песчаных, супесчаных и суглинистых почв снизится до 10%, варьирует для рассматриваемых районов в широком диапазоне, не превышая 64 лет. Сделан вывод о целесообразности обоснования величины приемлемого риска загрязнения сельскохозяйственной продукции с учётом радиологических и социально-экономических аспектов.

Ключевые слова: радиоактивное загрязнение сельскохозяйственных земель, радиоэкологическая оценка, вероятностный подход, продукция кормопроизводства, риск превышения нормативов, логнормальное распределение.

Введение

В Российской Федерации наибольшему радиоактивному загрязнению в результате чернбыльских выпадений подверглись юго-западные районы Брянской области. Значительную площадь загрязнённых территорий занимают земли сельскохозяйственного назначения. На основе зонирования по плотности загрязнения ^{137}Cs часть сельскохозяйственных угодий была выведена из землепользования. В настоящее время решаются вопросы, связанные с возвращением отчуждённых территорий в хозяйственное использование и организацией на них агропроизводства [1, 2].

Как отмечено в [1], условием перехода пострадавших территорий и населения к нормальной жизнедеятельности является *не превышение* трёх радиологических критериев:

- величины установленных национальных пределов средних годовых эффективных доз облучения населения;
- величины плотности загрязнения территории чернбыльскими радионуклидами;
- допустимого содержания радионуклидов в продукции.

Таким образом, ведение сельского хозяйства на территории юго-западных районов Брянской области не легитимно без соблюдения нормативов содержания ^{137}Cs в продукции растение-

Спиридонов С.И.* – гл. научн. сотр., д.б.н., проф.; Иванов В.В. – ст. научн. сотр., к.ф.-м.н.; Титов И.Е. – научн. сотр.; Нуштаева В.Э. – научн. сотр. ФГБНУ ВНИИРАЭ.

*Контакты: 249032, Калужская обл., Обнинск, Киевское шоссе, 109-й км. Тел.: (484) 399-69-67; e-mail: spiridonov.si@gmail.com.

водства, кормопроизводства и животноводства. В этой связи особую важность приобретает достоверная прогностическая оценка содержания этого радионуклида в агропродукции. Результаты такой оценки являются основой принятия решений по запрету использования сельскохозяйственных земель или внедрению различного рода реабилитационных мероприятий в агросфере.

Согласно данным радиоэкологического мониторинга территории юго-западных районов Брянской области основную проблему представляет загрязнение кормов. Среднее содержание ^{137}Cs в кормах может превышать ветеринарные допустимые уровни [3] в 3,7 раза, а доля кормов с превышением нормативов достигает 39% [1]. Данные радиационного контроля, проведённого в последние годы [4], показывают, что содержание ^{137}Cs в зелёной массе трав в отдельных пробах многократно (до 27 раз) превышают нормативы [3]. Высокое содержание ^{137}Cs в продукции кормопроизводства определяет превышение санитарно-гигиенических нормативов и в животноводческой продукции.

Целью работы, результаты которой представлены в настоящей статье, является радиоэкологическая оценка сельскохозяйственных угодий юго-западных районов Брянской области на основе вероятностного подхода к прогнозированию радиоактивного загрязнения продукции кормопроизводства.

Методический подход

Оценка и прогнозирование радиоэкологической обстановки на сельскохозяйственных землях юго-западных районов Брянской области выполняются, как правило, на основе детерминистского подхода [2, 4-5]. Средние по районам и хозяйствам значения плотностей загрязнения территорий и содержаний ^{137}Cs в агропродукции сопоставляются с радиоэкологическими критериями и нормативами [3, 6].

Вероятностный подход с использованием эмпирической информации, характеризующей содержание радионуклидов в продукции кормопроизводства, применяется для текущей оценки рисков её загрязнения [1]. Для получения статистически достоверных оценок в этом случае необходимы достаточные по объёму выборки данных [7]. Кроме того, данные должны быть представительными по отношению к территориям, которые охватывают рассматриваемые административные единицы. При нарушении этого условия, например, при отборе проб на наиболее загрязнённых участках, можно получить смещённые (недостоверные) для районов и хозяйств оценки.

В этой связи приобретают значимость расчётные методы оценки рисков загрязнения продукции кормопроизводства на основе данных, характеризующих вариабельность содержания радионуклидов в почве и коэффициентов накопления радионуклидов в растениях. Для отдалённого периода после чернобыльской аварии коэффициенты накопления полагаются постоянными величинами, а изменение плотности загрязнения почвы определяется только радиоактивным распадом.

В начале 90-х годов прошлого века выполнены оценки, продемонстрировавшие некорректность прогнозирования радиационной обстановки в сфере агропромышленного производства на основе средних значений радиоэкологических показателей. В работе [8] представлен вероятностный подход к определению доли сельскохозяйственной продукции с превышением временных допустимых уровней (ВДУ). Содержание радионуклидов в продукции растениеводства рассматривалось как произведение двух случайных величин – плотности загрязнения почвы и коэффициента перехода радионуклидов в растения. Допускалась возможность различных видов

статистических распределений уровней загрязнения почв и параметров переноса радионуклидов. Этот подход реализован в рамках системы поддержки принятия решений по внедрению защитных мероприятий в отдельных хозяйствах [9].

К настоящему времени сформированы объёмные массивы радиэкологической информации, характеризующей как плотности загрязнения сельскохозяйственных угодий Брянской области, так и коэффициенты накопления этого радионуклида в растительности. Анализ накопленных данных даёт возможность установить законы распределения этих показателей и определить статистические параметры для радиэкологического прогнозирования.

Обработка данных радиэкологического обследования сельскохозяйственных угодий юго-западных районов Брянской области [10] показала, что плотность загрязнения почвы ^{137}Cs подчиняется логарифмически нормальному закону распределения вероятностей [11]. Параметры распределения в масштабах районов оценены на уровне значимости 0,01, за исключением органических почв в силу малых выборок данных.

Информация по коэффициентам накопления ^{137}Cs (и других радионуклидов) в растениях в текущем столетии была систематизирована согласно радиэкологической классификации почв по механическому составу. В документах МАГАТЭ [12, 13] величины коэффициентов накопления приводятся в виде набора статистических характеристик, к которым относятся средние геометрические значения (GM) и стандартные отклонения логнормальных распределений (GSD).

Универсальность логнормального закона распределения радиоактивного загрязнения почв и миграционных параметров позволяет использовать свойство мультипликативности при статистическом прогнозировании накопления радионуклидов в различных звеньях сельскохозяйственных цепочек [14, 15].

Расчётный инструментарий

Радиэкологическая оценка сельскохозяйственных угодий юго-западных районов Брянской области на основе вероятностного подхода базировалась на решении трёх взаимосвязанных задач. «Прямая» задача заключается в прогнозировании рисков превышения норматива (РПН) содержания ^{137}Cs в продукции кормопроизводства. Оценка предельных уровней загрязнения лугопастбищных и кормовых угодий, обеспечивающих соблюдение заданных РПН, представляет собой «обратную» задачу. Третья задача – оценка времени автореабилитации территорий (без применения защитных мероприятий), по истечении которого достигаются допустимые РПН для продукции кормопроизводства.

Для решения этих задач разработан комплекс статистических моделей, которые на основе положения о подчинённости плотности радиоактивного загрязнения почв и миграционных параметров логнормальному закону распределения вероятностей, представлены в аналитическом виде [11].

Показателем накопления радионуклидов в продукции кормопроизводства является удельная активность **Ср**:

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

где **As** – плотность загрязнения территории; **Kn** – коэффициент накопления; **Ср** – концентрация радионуклидов в продукции; λ_0 – параметр, зависящий от толщины корнеобитаемого слоя и плотности почвы.

В силу принятых положений **Ср** является случайной величиной, принадлежащей логнормальному распределению **LN** (μ_c , σ_c^2). Его параметры определяются следующим образом:

$\mu_c = \mu_s + \mu_k$, а $\sigma_c^2 = \sigma_s^2 + \sigma_k^2$. В этих соотношениях фигурируют параметры логнормальных распределений плотности загрязнения почвы $LN(\mu_s, \sigma_s)$ и коэффициента накопления радионуклидов в растительности $LN(\mu_k, \sigma_k)$.

Используя параметры распределения $LN(\mu_c, \sigma_c^2)$ можно рассчитать среднее значение загрязнённости продукции в зависимости от времени:

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

где α – константа радиоактивного распада.

Выражение для оценки вероятности того, что содержание радионуклидов в продукции кормопроизводства превышает норматив, имеет вид:

$$R = \frac{1}{2} \left\{ 1 - \operatorname{erf} \left[\frac{\ln\left(\frac{\Lambda}{\lambda_0}\right) - \mu_c}{\sigma_c \sqrt{2}} \right] \right\}, \quad (3)$$

где R – риск превышения норматива Λ .

Вследствие сохранения параметра σ_c логнормального распределения случайной величины C_p в процессе радиоактивного распада зависимость РПН от времени можно представить следующим образом:

$$R(t) = \frac{1}{2} \left\{ 1 - \operatorname{erf} \left[\left(\ln\left(\frac{\Lambda}{\lambda_0}\right) - \mu_c + \alpha t \right) / (\sigma_c \sqrt{2}) \right] \right\}. \quad (4)$$

Уравнение для расчёта средней предельной плотности загрязнения территории A_R , на которой можно производить продукцию растениеводства с РПН («обратная» задача), не превышающим величины R , имеет следующий вид:

$$A_R = e^{\ln\left(\frac{\Lambda}{\lambda_0}\right) - \mu_c + 0,5 \sigma_c^2 - \sigma_c \sqrt{2} \operatorname{erf}^{-1}(1-2R)}, \quad (5)$$

Время T_R , по истечении которого за счёт радиоактивного распада достигаются допустимые РПН для продукции кормопроизводства, можно рассчитать следующим образом:

$$T_R = \frac{1}{\alpha} \left[\mu_c + \sigma_c \sqrt{2} \operatorname{erf}^{-1}(1-2R) - \ln\left(\frac{\Lambda}{\lambda_0}\right) \right]. \quad (6)$$

Выражение (6) является аналитической формой решения третьей сформулированной выше задачи – статистического прогнозирования времени автореабилитации территорий. Аналитические модели (3-6) пригодны для оценки существующей радиоэкологической ситуации и прогностических расчётов для сельскохозяйственных угодий на различных административно-территориальных уровнях. Представленные модели реализованы в виде программных модулей, предназначенных для оперативных расчётов в рамках решения трёх сформулированных выше задач.

Результаты и обсуждение

В настоящее время на территории шести наиболее загрязнённых районов Брянской области функционирует 135 сельскохозяйственных предприятий различных форм собственности. Площадь их кормовых угодий составляет 98567 га, из них: пастбища составляют 58278 га, сенокосы занимают 40289 га.

В табл. 1 представлена статистика распределения $LN(\mu_s, \sigma_s^2)$, которое удовлетворительно аппроксимирует накопленные к 2009 г. данные по загрязнению ^{137}Cs кормовых угодий для почв различного механического состава, согласно радиоэкологической классификации [12, 13]. Усреднённые значения (математические ожидания) плотности загрязнения $\langle A_s \rangle$ получены из статистик аппроксимирующего распределения по формуле:

$$\langle A_s \rangle = e^{\mu_s + 0,5 \sigma_s^2}. \quad (7)$$

Величины параметров логнормального распределения коэффициентов накопления ^{137}Cs в зелёной массе трав μ_{k1} и σ_k рассчитаны с использованием данных, приведённых в рекомендациях МАГАТЭ [12]. Для учёта «региональных особенностей» коэффициентов накопления ^{137}Cs в продукции кормопроизводства оценены параметры μ_{k2} с учётом содержания в почвах обменного калия (табл. 2).

Таблица 1

Статистики распределения и средние значения плотности загрязнения ^{137}Cs пастбищ с различным механическим составом почвы, кБк/м^2

Район	μ_s	σ_s	$\langle As \rangle$
Песчаные и супесчаные почвы			
Новозыбковский	6,14	0,380	500
Гордеевский	5,85	0,520	396
Злынковский	5,75	0,806	433
Красногорский	5,65	0,963	500
Клинцовский	5,44	0,898	343
Климовский	5,14	0,232	175
Суглинистые почвы			
Новозыбковский	6,24	0,530	588
Гордеевский	5,61	0,721	354
Злынковский	5,54	0,505	290
Красногорский	5,17	0,766	235
Клинцовский	4,65	0,810	145
Климовский	4,99	0,415	161
Органические почвы			
Новозыбковский	6,16	0,416	514
Гордеевский	6,08	0,394	474
Злынковский	5,37	0,791	292
Красногорский	5,57	0,652	324
Клинцовский	5,39	0,853	315
Климовский	5,29	0,247	204

Таблица 2

Статистики распределения коэффициентов накопления ^{137}Cs в зелёной массе трав для почв с различным механическим составом

Группа почв	μ_{k1}	μ_{k2}	σ_k
Песчаные и супесчаные	-2,62	-3,00	1,41
Суглинистые	-3,05	-3,47	1,41
Органические	-1,66	-1,95	0,790

Пастбища и сенокосы юго-западных районов Брянской области расположены в основном на легкосуглинистых, супесчаных и песчаных почвах с низкими естественными запасами калия. В этих районах процент пастбищ и сенокосов с содержанием обменного калия менее 80 мг/кг почвы колеблется от 60 до 80% [16]. Для обеспечения консервативности оценок в расчётах принимались максимальные коэффициенты накопления ^{137}Cs из почвы в продукцию, которые отвечают случаю низких величин обменного калия (не более 80 мг/кг почвы).

Выполнены сравнительные расчёты вероятностей превышения нормативов [3] содержания ^{137}Cs в продукции кормопроизводства на основе статистик распределения коэффициентов накопления, представленных в [16], и значений этого показателя, учитывающих региональные особенности (табл. 3). При расчётах использовали накопленные к 2009 г. данные радиоэкологического обследования кормовых угодий юго-западных районов Брянской области [10].

Значения РПН, рассчитанные с учётом региональных особенностей, в большей степени соответствуют рискам превышения норматива, оценённым по эмпирическим данным. Так, согласно [1], доля проб с превышением ветеринарных нормативов для зелёной массы трав в юго-западных районах Брянской области (с преобладающими супесчаными почвами) в 2009 г. составила 37%.

Таблица 3

РПН содержания ^{137}Cs в зелёной массе трав (2009 г.), рассчитанные с использованием коэффициентов накопления МАГАТЭ [16] (в числителе) и «региональных значений» этого параметра (в знаменателе), %

Район	Песчаные, супесчаные почвы	Суглинистые почвы	Органические почвы
Новозыбковский	55 / 44	51 / 40	100 / 99
Гордеевский	48 / 39	38 / 28	100 / 99
Злынковский	51 / 41	32 / 23	96 / 91
Красногорский	52 / 43	29 / 21	98 / 95
Клинцовский	45 / 36	20 / 14	96 / 93
Климовский	27 / 19	19 / 13	97 / 93

Рассчитаны зависимости предельной плотности загрязнения пастбищ и сенокосов от величины РПН содержания ^{137}Cs в зелёной массе трав и сене с учётом почв различного механического состава. На рис. 1 и 2 представлены такие зависимости для пастбищ Новозыбковского района, территория которого характеризуется наибольшими уровнями радиоактивного загрязнения почв, по сравнению с другими районами Брянской области.

Рис. 1. Зависимость предельной плотности загрязнения пастбищ ^{137}Cs от РПН для зелёной массы трав (100 Бк/кг) в Новозыбковском районе (1 – песчаные и супесчаные, 2 – суглинистые, 3 – органические почвы).

Наименьшая предельная плотность радиоактивного загрязнения (для любого заданного значения РПН) характерна для органических (торфяных) почв, которые можно считать «критичными» с точки зрения поступления ^{137}Cs в продукцию кормопроизводства. На суглинистых почвах можно получать продукцию при существенно более высоких уровнях радиоактивного загрязнения пастбищ и сенокосов.

В рамках решения третьей сформулированной выше задачи выполнено статистическое прогнозирование времени автореабилитации кормовых угодий юго-западных районов Брянской области. Расчёты выполнены на основе параметров логнормальных распределений плотностей загрязнения ^{137}Cs пастбищ и сенокосов, а также коэффициентов накопления этого радионуклида в растительности для почв с различным механическим составом. В табл. 4 и 5 представлены временные периоды (начиная с 2020 г.), по истечении которых риск превышения нормативов содержания ^{137}Cs в зелёной массе трав и сене достигнет значения 10%. Если время прогнозирования меньше величин, указанных в табл. 4 и 5, то вероятности превышения нормативов [3] будут выше 10%.

Рис. 2. Зависимость предельной плотности загрязнения сенокосов ^{137}Cs от РПН для сена (400 Бк/кг) в Новозыбковском районе (1 – песчаные и супесчаные, 2 – суглинистые, 3 – органические почвы).

«Жёсткий» пороговый уровень РПН (10%) задан с целью выполнения консервативной оценки. Разработанные расчётные инструменты позволяют выполнять оценки времени естественной реабилитации сельскохозяйственных угодий для различных пороговых РПН. Научное обоснование величины приемлемого риска загрязнения продукции с учётом не только радиологических, но и социально-экономических аспектов, представляется важной задачей, решение которой будет способствовать развитию подходов к классификации и зонированию сельскохозяйственных земель [14].

Таблица 4

Время достижения (начиная с 2020 г.) значения 10% РПН содержания ^{137}Cs в зелёной массе трав (норматив – 100 Бк/кг) для пастбищ с различными по механическому составу группами почв, годы

Район	Песчаные, супесчаные почвы	Суглинистые почвы	Органические почвы
Новозыбковский	61	56	135
Гордеевский	54	38	131
Злынковский	64	25	123
Красногорский	71	21	122
Клинцовский	57	2	129
Климовский	14	-	91

Относительно длительные времена автореабилитации кормовых угодий, по отношению к результатам аналогичных оценок с использованием средних показателей, объясняются учётом вариабельности плотностей загрязнения почвы и коэффициентов накопления ^{137}Cs в растительности. Следует подчеркнуть, что статистические параметры логнормального распределения плотности загрязнения ^{137}Cs песчаных, супесчаных и суглинистых почв юго-западных районов Брянской области определены с высокой степенью достоверности. В то же время, значения μ_k и σ_k , характеризующие распределения коэффициента накопления радионуклидов в растительности, могут быть скорректированы. Это возможно при дальнейшей детализации радиоэкологической классификации почв, использованной для систематизации данных по коэффициентам накопления [12, 13].

Таблица 5

Время достижения (начиная с 2020 г.) значения 10% РПН содержания ^{137}Cs в сене (норматив – 400 Бк/кг) для сенокосных угодий с различными по механическому составу группами почв, годы

Район	Песчаные, супесчаные почвы	Суглинистые почвы	Органические почвы
Новозыбковский	78	73	143
Гордеевский	55	44	145
Злынковский	74	24	160
Красногорский	72	37	144
Клинцовский	54	-	138
Климовский	18	-	94

Для получения дополнительной эмпирической информации по параметрам миграции радионуклидов в системе «почва – растения» необходимы весьма затратные комплексные исследования.

Заключение

Выполнена радиоэкологическая оценка «критических» сельскохозяйственных угодий юго-западных районов Брянской области на основе вероятностного подхода, в рамках которого содержание ^{137}Cs в продукции кормопроизводства рассматривалось как произведение двух случайных величин – плотности загрязнения почвы и коэффициента накопления радионуклидов в растениях. На основе анализа накопленной к настоящему времени эмпирической информации [10] определены параметры логнормального закона, которому подчиняется плотность загрязнения почвы ^{137}Cs на рассматриваемых территориях. Параметры логнормального распределения коэффициента накопления ^{137}Cs в растительности, представленные в документе МАГАТЭ [12], скорректированы с использованием региональных данных. Для решения задач, связанных со статистическим прогнозированием и оценкой сельскохозяйственных угодий юго-западных районов Брянской области, разработаны модели и соответствующие программные модули.

С использованием разработанного «инструментария» рассчитаны риски превышения нормативов содержания ^{137}Cs в продукции кормопроизводства, получаемой на почвах с различным механическим составом. Оценены предельные уровни загрязнения пастбищ и сенокосов ^{137}Cs , обеспечивающие соблюдение заданных РПН. Выполнено статистическое прогнозирование времени автореабилитации кормовых угодий юго-западных районов Брянской области, по истечении

которого достигается консервативное значение РПН для зелёной массы трав и сена (10%). В рамках решения задач нормирования представляется целесообразным обоснование величины приемлемого РПН для продукции кормопроизводства и растениеводства с учётом радиологических и социально-экономических аспектов.

Прогностические расчёты на основе вероятностного подхода являются существенным дополнением к оценке радиоактивного загрязнения сельскохозяйственной продукции на основе эмпирических данных. Расчёты с использованием достоверных параметров распределений плотности загрязнения почв позволяют избежать смещённых оценок, обусловленных тем, что выборки растительных проб могут быть непредставительными для значительных по площади территорий. Рассматриваемый методический подход и расчётный инструментарий могут применяться в рамках оптимизации радиозэкологического мониторинга сельскохозяйственных угодий юго-западных районов Брянской области.

Работа выполнена при поддержке Российского научного фонда (грант № 18-19-00016).

Литература

1. Радиоэкологические последствия аварии на Чернобыльской АЭС: биологические эффекты, миграция, реабилитация загрязнённых территорий /под ред. чл.-корр. РАН Н.И. Санжаровой и проф. С.В. Фесенко. М.: РАН, 2018. 278 с.
2. **Шубина О.А., Титов И.Е., Кречетников В.В., Санжарова С.И.** Итоги комплексной паспортизации сельскохозяйственных угодий Брянской области, загрязнённых радионуклидами //Агрохимический вестник. 2017. № 3. С. 35-39.
3. Ветеринарные правила обеспечения радиационной безопасности животных и продукции животного происхождения. Государственная система ветеринарного нормирования Российской Федерации. Радиационная безопасность. М.: Минсельхозпрод России. 2001. 55 с.
4. **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, загрязнённых радионуклидами в результате аварии на Чернобыльской АЭС //Радиационная гигиена. 2019. Т. 12, № 1. С. 25-35.
5. **Панов А.В., Санжарова Н.И., Шубина О.А., Гордиенко Е.В., Титов И.Е.** Современное состояние и прогноз загрязнения ¹³⁷Cs сельскохозяйственных угодий Брянской, Калужской, Орловской и Тульской областей, подвергшихся воздействию аварии на Чернобыльской АЭС //Радиация и риск. 2017. Т. 26, № 3. С. 66-74.
6. Гигиенические требования безопасности и пищевой ценности пищевых продуктов. Санитарно-эпидемиологические правила и нормативы. СанПиН 2.3.2.1078-01. М.: ФГУП «ИнтерСЭН», 2002. 168 с.
7. **Гераськин С.А., Фесенко С.В., Черняева Л.Г., Санжарова Н.И.** Статистические методы анализа эмпирических распределений коэффициентов накопления радионуклидов растениями //Сельскохозяйственная биология. 1994. № 1. С. 130-137.
8. **Фесенко С.В., Черняева Л.Г., Санжарова Н.И., Алексахин Р.М.** Вероятностный подход к прогнозированию радиоактивного загрязнения сельскохозяйственной продукции //Атомная энергия. 1993. Т. 34, № 6. С. 507-513.
9. **Fesenko S.V., Sanzharova N.I., Wilkins B.T., Nisbet A.F.** FORCON: Local decision support system for the provision of advice in agriculture – methodology and experience of practical implementation //Radiat. Prot. Dosim. 1995. V. 64, N 1-2. P. 157-164.
10. Единый реестр радиоактивно загрязнённых сельскохозяйственных земель России и Беларуси: авторское свидетельство № 2016620790 от 15.06.2016 /Шубина О.А., Титов И.Е., Нуштаев С.Н.; заявл. 09.03.2016; опубл. 20.07.2016.
11. **Иванов В.В., Спиридонов С.И.** Статистическое прогнозирование накопления радионуклидов в растениях //ZENODO. 2019. [Электронный ресурс]. URL: <http://doi.org/10.5281/zenodo.2593433> (дата обращения 17.08.2020).
12. Quantification of radionuclide transfer in terrestrial and freshwater environments for radiological assessments. Vienna: IAEA, 2009. 625 p.
13. Handbook of parameter values for prediction of radionuclide transfer in terrestrial and freshwater environments. Vienna: IAEA, 2010. 208 p.
14. **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.
15. **Спиридонов С.И., Иванов В.В.** Статистическое прогнозирование последствий радиоактивного загрязнения пастбищных сельскохозяйственных угодий //Радиационная биология. Радиоэкология. 2014. Т. 54, № 6. С. 621-631.
16. **Прудников П.В., Карпеченко С.В., Новиков А.А., Поликарпов Н.Г.** Агрохимическое и агроэкологическое состояние почв Брянской области. Брянск: Изд-во ГУП «Клинцовская городская типография», 2007. 608 с.

Radioecological assessment of forage agricultural land in the southwestern areas of the Bryansk region based on a set of statistical models

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

Russian Institute of Radiology and Agroecology, Obninsk

This paper presents a radioecological assessment of forage agricultural land in the southwestern districts of the Bryansk region based on data characterizing the variability of the radionuclides content in the soil. Concentration of ^{137}Cs in forage was calculated taking into account the probability distributions of ^{137}Cs soil contamination density and the soil to plant transfer factor. The processing data of the radioecological survey has shown the soil contamination density with ^{137}Cs of agricultural lands in the southwestern areas of the Bryansk region obeys a lognormal law. The authors have used statistical models and software modules for the radioecological assessment of forage lands. Risks of exceeding the ^{137}Cs content standards in forage obtained on soils with different texture have been calculated. The limiting levels of contamination of pastures and hayfields with ^{137}Cs , ensuring compliance with the specified risks for forage, have been estimated. The lowest limiting soil contamination density is characteristic of organic soils, which can be considered "critical" from the point of view of ^{137}Cs intake into forage. The authors have predicted the time of remediation of forage lands in the southwestern districts of the Bryansk region in the absence of protective measures based on a probabilistic approach. The time period during which the risk of forage contamination for sandy, sandy loam and clay loam soils will decrease to 10% varies for the areas under consideration in a wide range, not exceeding 64 years. It is concluded that it is advisable to substantiate the value of the acceptable risk of forage contamination, taking into account radiological and socio-economic aspects.

Key words: radioactive contamination of agricultural land, radioecological assessment, probabilistic approach, forage, risk of exceeding standards, lognormal distribution.

References

1. *Radioecological consequences of the Chernobyl accident: biological effects, migration, rehabilitation of contaminated areas.* Eds.: Corr. member of RAS N.I. Sanzharova, Prof. S.V. Fesenko. Moscow, RAS, 2018. 278 p. (In Russian).
2. **Shubina O.A., Titov I.E., Krechetnikov V.V., Sanzharova S.I.** Results of complex passportization of agricultural lands of south-western districts of the Bryansk region polluted by radionuclides. *Agrokhimicheskiiy vestnik – Agrochemical Bulletin*, 2017, no. 3, pp. 35-39. (In Russian).
3. *Veterinary regulations for ensuring radiation safety of animals and products of animal origin.* State system of veterinary regulation of the Russian Federation. Radiation safety. Moscow, Ministry of Agriculture and Food of Russia, 2001. 55 p. (In Russian).
4. **Panov A.V., Prudnikov P.V., Titov I.E., Krechetnikov V.V., Ratnikov 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 gigiyena – Radiation Hygiene*, 2019, vol. 12, no. 1, pp. 25-35. (In Russian).
5. **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, vol. 26, no. 3, pp. 66-74. (In Russian).
6. *Hygienic requirements of safety and nutritional value of food products.* Sanitarian and epidemiological standards and regulations. SanPiN 2.3.2.1078-01. Moscow, FSUE "InterSEN", 2002. 168 p. (In Russian).

Spiridonov S.I. * – Chief Researcher, D. Sc., Biol., Prof.; **Ivanov V.V.** – Sen. Researcher., C. Sc., Phys.-Math.; **Titov I.E.** – Researcher; **Nushtaeva V.E.** – Researcher. RIRAE.

*Contacts: 109 km, Kievskoe Sh., Obninsk, Kaluga region, Russia, 249032. Tel.: +7 (484) 399-69-67; e-mail: spiridonov.si@gmail.com.

7. **Geraskin S.A., Fesenko S.V., Chernyaeva L.G., Sanzharova N.I.** Statistical methods for the analysis of empirical distributions of the coefficient of accumulation of radionuclides by plants. *Sel'skokhozyaistvennaya biologiya – Agricultural Biology*, 1994, no. 1, pp. 130-137. (In Russian).
8. **Fesenko S.V., Chernyaeva L.G., Sanzharova N.I., Aleksakhin R.M.** A probabilistic approach to predicting radioactive contamination of agricultural products. *Atomnaya energiya – Atomic Energy*, 1993, vol. 34, no. 6, pp. 507-513. (In Russian).
9. **Fesenko S.V., Sanzharova N.I., Wilkins B.T., Nisbet A.F.** FORCON: Local decision support system for the provision of advice in agriculture – methodology and experience of practical implementation. *Radiat. Prot. Dosim.*, 1995, vol. 64, no. 1-2, pp. 157-164.
10. Unified register of radioactively contaminated agricultural lands of Russia and Belarus: author certificate No. 2016620790 dated 06.15.2016. Shubina O.A., Titov I.E., Nushtaev S.N.; declared 03.09.2016; publ. 07.20.2016. (In Russian).
11. **Ivanov V.V., Spiridonov S.I.** Statistical prediction of the accumulation of radionuclides in plants. *ZENODO*, 2019. Available at: <http://doi.org/10.5281/zenodo.2593433> (Accessed 15.08.2020).
12. *Quantification of radionuclide transfer in terrestrial and freshwater environments for radiological assessments*. Vienna, IAEA, 2009. 625 p.
13. *Handbook of parameter values for prediction of radionuclide transfer in terrestrial and freshwater environments*. Vienna, IAEA, 2010. 208 p.
14. **Spiridonov S.I., Ivanov V.V.** Probabilistic assessment of radionuclide accumulation in agricultural products and permissible levels of soil radioactive contamination. *Radiatsionnaya biologiya. Radioekologiya – Radiation Biology. Radioecology*, 2013, vol. 53, no.1, pp. 95-103. (In Russian).
15. **Spiridonov S.I., Ivanov V.V.** Statistical predicting of the consequences of radioactive contamination of pasture agricultural land. *Radiatsionnaya biologiya. Radioekologiya – Radiation Biology. Radioecology*, 2014, vol. 54, no. 6, pp. 621-631. (In Russian).
16. **Prudnikov P.V., Karpechenko S.V., Novikov A.A., Polikarpov N.G.** Agrochemical and agroecological state of soils of the Bryansk region. Bryansk, Klintsovskaya City Printing House, 2007. 608 p. (In Russian).