

**ПРОБЛЕМЫ ЭКОЛОГИИ
И РАЦИОНАЛЬНОГО ПРИРОДОПОЛЬЗОВАНИЯ.
БИОТЕХНОЛОГИИ
PROBLEMS IN ECOLOGY AND RATIONAL NATURE
MANAGEMENT. BIOTECHNOLOGIES**

Научная статья

УДК 630*182.9:630*913:574:44

<https://doi.org/10.25686/2306-2827.2024.3.82>

EDN: UJSDSI

Прогноз радиоактивного загрязнения продукции сельского и лесного хозяйства на бывших сельскохозяйственных угодьях Брянской области

А. Н. Переволоцкий , Т. В. Переволоцкая, И. Е. Титов, О. А. Шубина

Всероссийский научно-исследовательский институт радиологии и агроэкологии
Национального исследовательского центра «Курчатовский институт»,
Российская Федерация, 249035, Обнинск, Киевское шоссе, д.1, к.1
forest_rad@mail.ru 

Аннотация. *Введение.* Радиоактивное загрязнение окружающей среды вследствие аварии на Чернобыльской АЭС повлекло за собой ограничения на ведение сельского хозяйства на значительной площади в России, Беларуси и на Украине. Несмотря на то, что после аварии прошло уже более 30 лет, ~16 тыс. га сельскохозяйственных угодий Брянской области продолжают оставаться в категории выведенных из пользования и проблема их рационального использования остаётся по-прежнему актуальной. *Цель* исследования – прогнозная оценка распределения бывших сельскохозяйственных угодий по зонам радиоактивного загрязнения и группам почв, а также удельной активности ^{137}Cs в продукции сельского и лесного хозяйства при выращивании на этой территории. *Объекты и методы.* Прогнозная оценка распределения бывших сельскохозяйственных угодий по зонам радиоактивного загрязнения и группам почв на 30 лет проведена на основе анализа информации, содержащейся в базе данных с результатами радиологического обследования бывших сельскохозяйственных угодий Брянской области. Прогноз содержания ^{137}Cs выполняли в некоторых видах продукции сельского (зерна озимой ржи, клубнях картофеля, молока) и лесного (усреднённой грибной корзине, окорённой и неокорённой древесине сосны обыкновенной и дуба черешчатого) хозяйства на основе коэффициентов перехода (пропорциональности). *Результаты.* Установлено, что в 2024 году ~46 % бывших сельскохозяйственных угодий на дерново-подзолистых почвах характеризуются плотностью загрязнения ^{137}Cs от 555 до 1480 кБк/м². К 2055 году в зону с плотностью загрязнения почвы ^{137}Cs 185–555 кБк/м² перейдёт ~54 % угодий и в зону 37–185 кБк/м² ~16 %. Зерно озимой ржи, соответствующее допустимому нормативу на содержание ^{137}Cs , возможно получить на площади 2,3 тыс. га в 2024 году и 6,1 тыс. га в 2055 году. Выращивание картофеля и получение кормов для молочного скота с допустимым содержанием ^{137}Cs возможно на дерново-подзолистых песчаных и супесчаных почвах при плотности загрязнения ^{137}Cs <555 кБк/м² (3,8 тыс. га), а на легко- и среднесуглинистых – <1480 кБк/м² (5,7 тыс. га). Лесные грибы продолжают оставаться критичным продуктом питания по содержанию ^{137}Cs и норматив на содержание этого радионуклида может быть превышен при плотности загрязнения дерново-подзолистой песчаной и супесчаной почвы ~37 кБк/м², а на суглинистых почвах – до 185 кБк/м². Одним из эффективных путей использования земель, выведенных из сельскохозяйственного пользования, является их передача в лесной фонд для последующей посадки лесных культур или содействию естественному лесовозобновлению.

Ключевые слова: радиоактивное загрязнение; удельная активность; радионуклиды; плотность загрязнения; продукты питания; грибы; древесина

Финансирование: работа выполнена согласно государственному заданию НИЦ Курчатовский институт – ВНИИРАЭ.

© Переволоцкий А. Н., Переволоцкая Т. В., Титов И. Е., Шубина О. А., 2024

Для цитирования: Переволоцкий А. Н., Переволоцкая Т. В., Титов И. Е., Шубина О. А. Прогноз радиоактивного загрязнения продукции сельского и лесного хозяйства на бывших сельскохозяйственных угодьях Брянской области // Вестник Поволжского государственного технологического университета. Сер: Лес. Экология. Природопользование. 2024. № 3(63). С. 82–93. <https://doi.org/10.25686/2306-2827.2024.3.82>; EDN: UJSDSI

Введение

Авария на Чернобыльской АЭС вызвала масштабное радиоактивное загрязнение окружающей среды и повлекла за собой ограничение ведения сельскохозяйственного производства на обширных территориях Беларуси, России и Украины [1, 2]. На начальных этапах формирования радиационно-экологической обстановки на загрязнённых территориях актуализировались вопросы получения нормативно чистой продукции сельскохозяйственного производства [1]. Высокому уровню накопления радионуклидов в продукции во многом способствовало преобладание на этих территориях дерново-подзолистых песчаных и супесчаных почв с низким содержанием гумуса и обменных оснований [3]. По этой причине с 1987 года в Брянской области началось поэтапное выведение из землепользования наиболее загрязнённых сельскохозяйственных угодий в хозяйствах Гордеевского, Злынковского, Клинцовского, Красногорского и Новозыбковского районов. В дальнейшем, по мере прохождения автореабилитационных процессов, происходило снижение плотности загрязнения почвы, однако и спустя 30 лет после аварии ~16 тыс. га сельскохозяйственных угодий относились к категории выведенных из пользования [2]. Примерно 80 % земель имели плотность загрязнения почвы $^{137}\text{Cs} > 555 \text{ кБк/м}^2$, причём 57,6 % относились к пастбищам и сенокосам. По мере дальнейшего очищения природной среды от радионуклидов продолжают оставаться актуальными вопросы рационального использования бывших сельскохозяйственных угодий. В работах [2, 4] показана необходимость комплексного учёта радиологических и почвенно-экологических факторов при принятии решений о безопасном использовании бывших сельскохозяйственных угодий.

Как правило, основными вариантами дальнейшего использования этих земель являются [2, 5, 6]:

- возврат в хозяйственный оборот при возможности получения нормативно-чистой продукции и приемлемых дозах внешнего облучения работающих;
- передача в лесной фонд для последующего естественного лесовозобновления или создания лесных культур при невозможности получения продукции сельского хозяйства, соответствующей допустимым уровням;
- сохранение статуса выведенных из пользования земель при высоком уровне радиоактивного загрязнения и дозах внешнего облучения работающих. В этом случае возможно проведение мероприятий, содействующих естественному возобновлению леса.

Таким образом, **целью** настоящего исследования явилась прогнозная оценка распределения бывших сельскохозяйственных угодий по зонам радиоактивного загрязнения и группам почв, а также удельной активности ^{137}Cs в продукции сельского и лесного хозяйства при выращивании на этой территории.

Объекты и методы

Оценка распределения бывших сельскохозяйственных угодий по зонам радиоактивного загрязнения и группам почв проведена на основе анализа информации, содержащейся в базе данных¹ с результатами радиологического обследования бывших сельскохозяйственных угодий Брянской области. База данных содержит информацию об административной и хозяйственной принадлежности элементарных участков каждого угодья, плотности

¹ Шубина О. А., Титов Е. И. Электронный реестр земель с высоким уровнем радиоактивного загрязнения (ЭЛРЕВУЗ). Свидетельство о регистрации базы данных, № 2016620529 от 26.04.2016.

загрязнения почвы основным дозообразующим радионуклидом – ^{137}Cs , мощности амбиентного эквивалента дозы внешнего гамма-излучения, виду угодья, типу почвы, основным агрохимическим показателям на момент обследования в 2007–2010 гг. Согласно предварительному анализу, к категории выведенных из пользования относились сельскохозяйственные угодья общей площадью ~16 тыс. га с плотностью загрязнения почвы ^{137}Cs свыше 111 кБк/м². При этом, натурное обследование угодий свидетельствовало о наличии на ~10 % территории сформировавшейся древесно-кустарниковой растительности с преобладанием мягколиственных пород [2].

Прогнозную оценку плотности загрязнения почвы по каждому элементарному участку выполняли с учётом радиоактивного распада и миграции радионуклида ^{137}Cs за пределы корнеобитаемого слоя почвы:

$$A(t) = A(t_0) \cdot e^{-(\lambda_r + \lambda_s) \cdot T}, \quad (1)$$

где $A(t)$ – плотность загрязнения почвы элементарного участка ^{137}Cs на момент прогнозирования, кБк/м²; $A(t_0)$ – плотность загрязнения почвы ^{137}Cs на год проведения обследования, кБк/м²; λ_r – постоянная радиоактивного распада ^{137}Cs , 0,023 год⁻¹; λ_s – постоянная выноса радионуклида за пределы корнеобитаемого слоя, 0,046 год⁻¹ [7]; T – промежуток времени с момента обследования до составления прогноза, лет. Постоянная выноса радионуклида за пределы корнеобитаемого слоя почвы консервативно принимается постоянной для всех групп почв, на которых выращиваются сельскохозяйственные культуры.

Площади элементарных участков суммировали для каждого года прогнозирования по группам почв (дерново-подзолистой песчаной и супесчаной, суглинистой и глинистой, торфяно-болотной) и диапазонам плотности радиоактивного загрязнения почвы ^{137}Cs

(37–185, 185–555, 555–1480 и более 1480 кБк/м²) согласно существующему зонированию территорий.

Прогнозную оценку содержания ^{137}Cs выполняли в некоторых видах продукции сельского (зерна озимой ржи, клубнях картофеля, молока) и лесного хозяйства. В последнем случае рассматривали усреднённую грибную корзину, используемую в пищевых целях, или так называемый «средний гриб» [8], а также неокорённую древесину сосны обыкновенной и дуба черешчатого при условии произрастания их на дерново-подзолистых песчаных и суглинистых почвах [2], соответственно.

Для граничных значений плотности загрязнения почвы в зонах радиоактивного загрязнения для года t рассчитывали прогнозируемую удельную активность ^{137}Cs в зерне озимой ржи, клубнях картофеля и неокорённой древесине:

$$SA_{i,j}(t) = A(t) \cdot Tf_{i,j}, \quad (2)$$

где $Tf_{i,j}$ – коэффициент перехода (пропорциональности) ^{137}Cs для продуктивной части i -й сельскохозяйственной культуры или неокорённой древесины, произрастающей на j -й группе почв (табл. 1) [2], 10⁻³ м²/кг. Коэффициент перехода принят постоянным, исходя из условия квазиравновесного распределения радионуклида в системе «почва–растение» [2, 9, 10].

Прогнозируемое содержание ^{137}Cs в молоке и усреднённой грибной корзине на год t рассчитывали с учётом динамики параметров накопления [8]:

$$SA_{i,j}(t) = A(t) \times e^{\lambda_r \cdot (t-1986)} \times Tf_{i,j}(1986) \times (a_{i,j} \cdot e^{-c_{i,j} \cdot (t-1986)}), \quad (3)$$

где $Tf_{i,j}(1986)$ – коэффициент перехода (пропорциональности) ^{137}Cs для молока или «среднего гриба», полученного для j -й группы почв на момент поступления радионуклидов в окружающую среду, 10⁻³ м²/кг (табл.1); $a_{i,j}$ и $c_{i,j}$ – коэффициенты для молока или «среднего гриба», собранных на j -й группе почв, отн. ед. и год⁻¹, соответственно.

Таблица 1. Коэффициенты перехода (пропорциональности) ^{137}Cs для видов продукции и численные значения параметров [2, 8]

Table 1. Transfer (proportionality) factors of ^{137}Cs for product types and numerical values of parameters [2, 8]

Вид продукции	Параметр	Группы почв		
		дерново-подзолистые песчаные и супесчаные	дерново-подзолистые легко- и средне-суглинистые	торфяно-болотные
Зерно озимой ржи	Tf_{ij}	0,2	0,06	0,4
Клубни картофеля		0,1	0,05	0,3
Молоко	$Tf_{ij}(1986)$	7,5	2	10
	a_{ij}	0,12	0,12	0,045
	c_{ij}	0,0693	0,0693	0,0231
«Средний гриб»	$Tf_{ij}(1986)$	20	6	30
	a_{ij}	1		
	c_{ij}	0,0408		
Неокорённая древесина сосны	Tf_{ij}	5	-	-
Неокорённая древесина дуба	Tf_{ij}	-	1,5	-

При расчёте удельной активности ^{137}Cs в исследуемых видах продукции ($SA_{ij}(t)$) консервативно принимали коэффициент вариации (V) 50 % для всех коэффициентов перехода (пропорциональности) [11]. Соответственно, величину удельной активности ^{137}Cs приводили в виде $SA_{ij}(t) \pm \sigma_{SA}$ (σ_{SA} – стандартное отклонение рассчитанной удельной активности радионуклида), что позволило сформировать представление о диапазоне, в котором могут находиться исследуемые значения.

Рассчитанные удельные активности ^{137}Cs в продуктах питания сравнивали с нормативами: 40 Бк/кг для хлеба, 80 Бк/кг для клубней картофеля, 100 Бк/л для молока и 500 Бк/кг для свежих дикорастущих грибов.² Следует указать, что удельная активность ^{137}Cs в хлебе, как правило, в два раза меньше по сравнению с исходным сырьём – зерно озимой ржи, что позволяет консервативно оценить

возможность его заготовки для пищевого потребления.

Результаты и их обсуждение

В настоящее время ~ 46 %, или около 7,4 тыс. га, загрязнённых земель относится к дерново-подзолистым песчаным, супесчаным и суглинистым почвам с плотностью загрязнения ^{137}Cs 555–1480 кБк/м² (табл. 2).

Площадь угодий в зоне 185–555 кБк/м² составляет 5,5 тыс. га, или ~ 35 %. Доля территорий на торфяно-болотных почвах относительно невелика – 12 %. По мере радиоактивного распада прогнозируется перераспределение угодий по зонам радиоактивного загрязнения. К 2040 году ожидается уменьшение в четыре раза площади территории с плотностью загрязнения >1480 кБк/м²: до 130 га, или <1 %. Около 8 тыс. га земель (~ 50 % всех земель) будет находиться в зоне 185–555 кБк/м², причём основная часть их представлена дерново-подзолистыми песчаными и супесчаными почвами (~ 5 тыс. га). Примерно на 3 тыс. га уменьшится площадь угодий в зоне 555–1480 кБк/м² (табл. 2).

² ТР ТС 021/2011 Технический регламент Таможенного союза «О безопасности пищевой продукции» (с изменениями на 25 ноября 2022 года).

Таблица 2. Существующее и прогнозное распределение площади бывших сельскохозяйственных угодий по зонам радиоактивного загрязнения и группам почв Брянской области

Table 2. Actual and predicted distribution of the area of former agricultural lands throughout zones of radioactive contamination and soil groups of the Bryansk Region

Плотность загрязнения ^{137}Cs , кБк/м ²	Группы почв		
	Дерново-подзолистые песчаные и супесчаные, га (%)	Дерново-подзолистые легко- и среднесуглинистые, га (%)	Торфяно-болотные, га (%)
2024 год			
37–185	211 (1,3)	99 (0,6)	–
185–555	3561 (22,4)	1974 (12,5)	858 (5,4)
555–1480	3743 (23,6)	3668 (23,1)	1004 (6,3)
>1480	543 (3,4)	210 (1,3)	18 (0,1)
2040 год			
37–185	477 (3)	268 (1,7)	–
185–555	4951 (31,1)	3131 (19,7)	1455 (9,2)
555–1480	2507 (15,8)	2552 (16,1)	407 (2,5)
>1480	123 (0,8)	–	18 (0,1)
2055 год			
37–185	1573 (9,9)	712 (4,5)	262 (1,6)
185–555	4793 (30,2)	3838 (24,2)	1328 (8,4)
555–1480	1692 (10,6)	1401 (8,8)	290 (1,8)
>1480	–	–	–

К 2055 году в зоне 555–1480 кБк/м² площадь бывших сельскохозяйственных земель уменьшится почти в два раза по сравнению с 2024 годом и составит ~ 3 тыс. га, или ~ 20 % от всей территории. Наибольшее количество бывших сельскохозяйственных угодий к 2055 году будет сосредоточено в зоне 185–555 кБк/м² (~ 8,6 тыс. га земель, или ~ 54 % от всей территории). Площадь сельскохозяйственных угодий в зоне 37–185 кБк/м² увеличится почти в семь раз по сравнению с 2024 годом, достигнув величины 2,5 тыс. га по всем группам почв. В целом же, увеличение площади бывших сельскохозяйственных угодий в этой зоне радиоактивного загрязнения является обнадеживающим для введения их в оборот при условии соответствия нормативному содержанию ^{137}Cs в продукции растениеводства и животноводства.

Прогнозируемая удельная активность ^{137}Cs в зерне озимой ржи и клубнях картофеля приведена в табл. 3. Как следует из представленных данных, наиболее ве-

роятно получение зерна озимой ржи с допустимым содержанием ^{137}Cs при выращивании на дерново-подзолистых песчаных и супесчаных почвах при плотности загрязнения < 185 кБк/м², а на легко- и среднесуглинистых – < 555 кБк/м². Таким образом, сопоставляя прогноз удельной активности ^{137}Cs в зерне и распределение бывших сельскохозяйственных угодий по зонам радиоактивного загрязнения, отметим, что в настоящее время зерно с допустимым содержанием радионуклида можно получить на общей площади 2,3; к 2040 году – на 3,9; а к 2055 году – 6,1 тыс. га.

Содержание ^{137}Cs в клубнях картофеля может соответствовать допустимому нормативу при выращивании на дерново-подзолистых песчаных и супесчаных почвах с плотностью загрязнения до 555, а для суглинистых – даже до 1480 кБк/м² (табл. 3). Соответственно, для первой группы почв допустимый норматив не будет превышен на 3,8 тыс. га в 2024 году и на 6,4 тыс. га в 2055 году.

Таблица 3. Прогнозируемая удельная активность ^{137}Cs в зерне озимой ржи и клубнях картофеля по [2]Table 3. Predicted specific activity of ^{137}Cs in winter rye grain and potato tubers according to [2]

Плотность загрязнения почвы, кБк/м ²	Группы почв		
	дерново- подзолистые песчаные и супесчаные	дерново- подзолистые легко- и средне- суглинистые	торфяные
Зерно ржи озимой			
37	7±4	2±1	15±8
185	37±18	11±6	74±7
555	111±55	33±17	222±111
1480	296±148	89±45	592±296
Клубни картофеля			
37	4±2	2±1	11±6
185	19±10	9±5	56±28
555	56±28	28±14	167±84
1480	148±74	74±37	444±222

На дерново-подзолистых суглинистых почвах выращивание картофеля возможно при плотности загрязнения < 1480 кБк/м², т. е. практически на всех выведенных из пользования угодьях в этой группе почв, что составляет 5,7 тыс. га. Оценка содержания ^{137}Cs в зерне озимой ржи и клубнях картофеля при выращивании на торфяно-болотных почвах свидетельствует о возможном соответствии допустимым нормативам при плотности загрязнения < 185 кБк/м², но, как правило, в этих условиях пропашные культуры возделывать не рекомендуется.

Содержание ^{137}Cs в молоке будет соответствовать допустимому нормативу при выращивании кормов для молочного скота на дерново-подзолистых легко- и среднесуглинистых почвах независимо от её плотности загрязнения. В 2024 и 2040 гг. рекомендуется ограничить использование кормов, выращенных на дерново-подзолистых песчаных и супесчаных почвах при плотности загрязне-

ния ^{137}Cs 555 кБк/м². Это ограничение можно будет снять к 2055 году практически во всех зонах радиоактивного загрязнения.

Вместе с тем, в большинстве случаев кормопроизводство осуществляется на торфяно-болотных почвах, которым свойственна, с одной стороны, большая урожайность кормовых культур и естественных травостоев, а с другой – повышенное накопление ^{137}Cs зелёной массой. Соответственно, при использовании таких кормов превышение допустимого норматива по содержанию радиоцезия в молоке возможно в 2024 году при плотности загрязнения почвы 300 кБк/м² и 2055 году – 370 кБк/м². В 2055 году гарантировано получить молоко, соответствующее допустимому нормативу, можно только при использовании кормов, выращенных на торфяно-болотных почвах с плотностью загрязнения 37–185 кБк/м² на площади 262 га, или 1,6 % от всей территории (табл. 4).

Таблица 4. Прогнозируемая объёмная активность ^{137}Cs в молоке по [8]Table 4. Predicted volumetric activity of ^{137}Cs in milk according to [8]

Плотность загрязнения почвы, кБк/м ²	Группы почв		
	дерново-подзолистые песчаные и супесчаные	дерново-подзолистые легко- и среднесуглинистые	торфяно- болотные
2024 год			
37	5±3	<2	13±7
185	27±14	7±4	64±32
555	82±41	22±11	191±96
1480	217±109	58±26	502±251
2040 год			
37	3±1	<2	11±6
185	14±7	4±2	57±28
555	41±21	11±6	172±86
1480	108±56	29±15	453±227
2055 год			
37	<2	<2	10±5
185	7±4	2±1	52±26
555	21±11	5±3	155±78
1480	54±27	14±7	408±204

Лесные грибы продолжают оставаться критичным продуктом питания по накоплению ^{137}Cs , что подтверждается прогнозными расчётами (табл. 5). Так, в 2024 году норматив по содержанию радионуклида в усреднённой грибной корзине может быть превышен при плотности загрязнения дерново-подзолистой песчаной и супесчаной почвы ~ 37 кБк/м², а на суглинистых почвах – до 185 кБк/м². При этом превышение допустимого содержания ^{137}Cs в грибах могло бы наблюдаться на торфяно-болотных почвах даже в диапазоне плотно-

сти загрязнения 18–37 кБк/м², однако эти условия местопроизрастания не типичны. В целом же, тенденция наиболее высокого уровня загрязнения грибов прогнозируется и в последующие годы. При этом важно учесть, что накопление ^{137}Cs сильно накапливающими грибами (польский гриб, различные виды маслят) примерно в два раза больше по сравнению с усреднённой грибной корзиной, поэтому необходимо проведение обязательного радиометрического контроля при их заготовке даже на условно «чистой» территории < 37 кБк/м².

Таблица 5. Прогнозируемая удельная активность ^{137}Cs в усреднённой грибной корзине по [8]Table 5. Predicted specific activity of ^{137}Cs in the average mushroom basket according to [8]

Плотность загрязнения почвы, кБк/м ²	Группы почв		
	дерново-подзолистые песчаные и супесчаные	дерново-подзолистые легко- и среднесуглинистые	торфяно- болотные
2025 год			
37	371±185	111±56	557±279
185	1855±928	557±279	2783±1392
555	5566±2780	1670±835	8349±4175
2040 год			
37	285±142	85±43	427±213
185	1423±712	427±214	2134±1067
555	4268±2134	1280±640	6402±3201
2055 год			
37	218±109	65±33	327±164
185	1091±546	327±164	1636±818
555	3273±1637	982±491	4909±2455

Перевод бывших земель сельскохозяйственного назначения в лесной фонд рекомендуется при низком балле почвенного плодородия, зарастании древесно-кустарниковой растительностью и большой плотности радиоактивного загрязнения почвы, что определяет вероятность получения продукции с превышением допустимого содержания радионуклидов [2, 5, 6]. Одним из вариантов эффективно-го использования таких территорий является посадка лесных культур, поскольку до достижения спелости древостоя пройдёт не менее трёх периодов полураспада ^{137}Cs и это приведёт к снижению содержания радионуклида в компонентах лесного биогеоценоза почти на порядок [6]. При этом прогнозные расчёты свидетельствуют, что в типичных лесорастительных условиях при плотности загрязнения почвы ^{137}Cs в диапазоне от 37 до 185 кБк/м² удельная активность неокорённой древесины дуба может достигать 280 Бк/кг и для сосны – 925 Бк/кг, а при 1480 кБк/м² – 2220 и 7400 Бк/кг соответственно (табл. 6). Отметим, что существующий нормативный документ³ определяет очень широкий спектр допустимой удельной активности радионуклидов в древесине в зависимости от её назначения. Ещё одна

важная особенность состоит в том, что в нормативном документе не оговаривается вид отпуска древесины с лесосеки (в окорённом или неокорённом виде). Соответственно, окорка древесины сосны может снизить её удельную активность в полтора, а для дуба – почти в три раза. В целом же, анализ площади выведенных из сельскохозяйственного пользования земель при различной плотности загрязнения почвы ^{137}Cs (табл. 2) и оценка достижения спелости древостоев (не менее 90 лет от момента посадки культур) свидетельствует о возможности получения древесины, соответствующей допустимым нормативам содержания радионуклида практически на всех бывших сельскохозяйственных угодьях, выведенных из оборота.

Таким образом, посадка лесных культур или содействие естественному лесовозобновлению может стать наиболее эффективным методом рационального использования выведенных из сельскохозяйственного пользования земель при загрязнении окружающей среды ^{137}Cs , а в случае загрязнения долгоживущими трансурановыми элементами – восстановления природных биогеоценозов в соответствии с природно-климатическими условиями загрязнённой территории.

Таблица 6. Прогнозируемая удельная активность ^{137}Cs в неокорённой древесине сосны и дуба по [2]

Table 6. Predicted specific activity of ^{137}Cs in the unbarked pine and oak wood according to [2]

Плотность загрязнения почвы, кБк/м ²	Группы почв, древесная порода	
	дерново-подзолистые песчаные и супесчаные, сосна	дерново-подзолистые легко- и среднесуглинистые, дуб
37	185±93	56±28
185	925±463	280±140
555	2775±1388	832±416
1480	7400±3700	2220±1100

³ СП 2.6.1.759-99. Допустимые уровни содержания цезия-137 и стронция-90 в продукции лесного хозяйства.

Выводы

1. На основе анализа базы данных «Электронный реестр земель с высоким уровнем радиоактивного загрязнения (ЭЛРЕВУЗ)» выполнен прогноз распределения выведенных из оборота сельскохозяйственных угодий Брянской области по зонам радиоактивного загрязнения и типам почв на период до 2055 года, а также удельной активности ^{137}Cs в зерне озимой ржи, клубнях картофеля, молоке, усреднённой грибной корзине, неокорённой древесине сосны и дуба.

2. В 2024 году ~ 46 % бывших сельскохозяйственных угодий на дерново-подзолистых почвах характеризуются плотностью загрязнения ^{137}Cs от 555 до 1480 кБк/м². К 2055 году ~ 54 % угодий будет находиться в зоне с плотностью загрязнения почвы ^{137}Cs 185–555 кБк/м² и ~ 16 % – 37–185 кБк/м², что позволяет предположить о потенциальной возможности их использования при соответствии продукции растениеводства и животноводства допустимым нормативам.

3. В настоящее время выращивание зерна озимой ржи, соответствующего нормативу по содержанию ^{137}Cs , возможно на дерново-подзолистых песчаных и супесчаных почвах с плотностью загрязнения ^{137}Cs <185 кБк/м², а на легко- и среднесуглинистых – <555 кБк/м², т. е. на площади 2,3 тыс. га. К 2040 году эта площадь увеличится до 3,9, а к 2055 году – 6,1 тыс. га. Выращивание картофеля возможно на дерново-подзолистых песчаных и супесчаных почвах при её плотно-

сти загрязнения ^{137}Cs <555 кБк/м², а на легко- и среднесуглинистых – <1480 кБк/м². Соответственно, к 2055 году примерно на 6 тыс. га этой группы почв прогнозируется возможность получения картофеля с допустимым содержанием ^{137}Cs .

4. Получение кормов для молочного скота, обеспечивающих допустимое содержание ^{137}Cs в молоке, возможно в 2024 году, при плотности загрязнения дерново-подзолистой песчаной и супесчаной почвы до 555 кБк/м² и до 1480 кБк/м² – на суглинистой, причём к 2055 году эти ограничения могут быть сняты для всех зон радиоактивного загрязнения.

5. Лесные грибы продолжают оставаться критичным продуктом питания по накоплению ^{137}Cs , норматив содержания радионуклида в усреднённой грибной корзине может быть превышен при плотности загрязнения дерново-подзолистой песчаной и супесчаной почвы ~ 37 кБк/м², а на суглинистых почвах – до 185 кБк/м².

6. Одним из эффективных путей использования выведенных из сельскохозяйственного оборота земель является их передача в лесной фонд для последующей посадки лесных культур или содействию естественному лесовозобновлению. В этом случае произойдет формирование естественных биогеоценозов, соответствующих природно-климатическим условиям исследуемой территории, а по достижению возраста спелости древостоев возможно получение древесины с допустимым содержанием радионуклидов.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Крупные радиационные аварии: последствия и защитные меры: монография / Р. М. Алексахин, Л. А. Булдаков, В. А. Губанов и др.; под ред. Л. А. Ильина и В. А. Губанова. М.: ИздАТ, 2001. 752 с. EDN: YRWXNC

2. Радиоэкологические последствия аварии на Чернобыльской АЭС: биологические эффекты, миграция, реабилитация загрязнённых территорий: монография / В. С. Анисимов, С. А. Гераськин, И. В. Гешель и др.; под ред. Н. И. Санжаровой

и С. В. Фесенко. М.: РАН, 2018. 278 с. EDN: XUBZYT

3. Сельскохозяйственная радиоэкология / Р. М. Алексахин, А. В. Васильев, В. Г. Дикарев и др.; под ред. Р. М. Алексахина, Н. А. Корнеева. М.: Экология, 1992. 400 с.

4. Мерзлова О. А., Шанишеева Т. П. Комплексная оценка возможности возвращения в сельскохозяйственное производство земель, подвергшихся радиоактивному загрязнению // Радиационная

биология. Радиоэкология. 2018. Т. 58, № 5. С. 535–547. DOI: 10.1134/S0869803118050119; EDN: VKYOBV

5. Романов Г. Н. Ликвидация последствий радиационных аварий: справочное руководство. М.: ИздАТ, 1993. 336 с.

6. Лес. Человек. Чернобыль. Лесные экосистемы после аварии на Чернобыльской АЭС: состояние, прогноз, реакция населения, пути реабилитации / В. А. Ипатьев, В. Ф. Багинский, И. М. Булавик и др.; под ред. В. А. Ипатьева. Гомель: Институт леса НАН Беларуси, 1999. 454 с.

7. Generic models for use in assessing the impact of discharges of radioactive substances to the environment (Safety Reports Series No. 19). Vienna: International Atomic Energy Agency, 2001. 216 p.

8. МУ 2.6.1.3806-22. Прогноз доз облучения населения цезием-137 при его попадании в окружающую среду. Методические указания. М.: Федеральная служба по надзору в сфере защиты прав потребителей и благополучия человека, 2022. 9 с.

9. Behavior of Radionuclides in the Environment II: Chernobyl / Eds. A. Konoplev, K. Kato, S. Kalmykov. Singapore: Springer, 2020. 443 p. DOI: 10.1007/978-981-15-3568-0

10. Behavior of Radionuclides in the Environment III: Fukushima / Eds. K. Nanda, A. Konoplev, T. Wada. Singapore: Springer, 2022. 510 p. DOI: 10.1007/978-981-16-6799-2

11. Quantification of radionuclide transfer in terrestrial and freshwater environments for radiological assessments (IAEA-TECDOC-1616). Vienna: International Atomic Energy Agency, 2009. 616 p.

Статья поступила в редакцию 20.06.2024; одобрена после рецензирования 28.08.2024; принята к публикации 20.09.2024

Информация об авторах

ПЕРЕВОЛОЦКИЙ Александр Николаевич – доктор биологических наук, ведущий научный сотрудник лаборатории математического моделирования и программно-информационного обеспечения, Всероссийский научно-исследовательский институт радиологии и агроэкологии Национального исследовательского центра «Курчатовский институт». Область научных интересов – радиационная экология окружающей среды, расчётные методы дозиметрии. Автор 250 научных публикаций, в том числе четырёх монографий. ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-6913-7609>; SPIN-код: 1469-3199

ПЕРЕВОЛОЦКАЯ Татьяна Витальевна – кандидат биологических наук, доцент, старший научный сотрудник лаборатории математического моделирования и программно-информационного обеспечения, Всероссийский научно-исследовательский институт радиологии и агроэкологии Национального исследовательского центра «Курчатовский институт». Область научных интересов – радиационная экология окружающей среды, расчётные методы дозиметрии. Автор 200 научных публикаций, в том числе двух монографий. ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-8250-5536>; SPIN-код: 4562-3671

ТИТОВ Игорь Евгеньевич – научный сотрудник лаборатории математического моделирования и программно-информационного обеспечения, Всероссийский научно-исследовательский институт радиологии и агроэкологии Национального исследовательского центра «Курчатовский институт». Область научных интересов – радиационная экология окружающей среды, геоинформатика. Автор 200 научных публикаций, в том числе четырёх монографий. SPIN-код: 2589-2233

ШУБИНА Ольга Андреевна – кандидат биологических наук, заместитель директора по научной работе, Всероссийский научно-исследовательский институт радиологии и агроэкологии Национального исследовательского центра «Курчатовский институт». Область научных интересов – радиационная экология окружающей среды, методы реабилитации радиоактивно загрязнённых территорий. Автор 250 научных публикаций, в том числе четырёх монографий. SPIN-код: 7036-8172

Вклад авторов: все авторы сделали эквивалентный вклад в подготовку публикации.

Конфликт интересов: авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.
Все авторы прочитали и одобрили окончательный вариант рукописи.

Scientific article

UDC 630*182.9:630*913:574:44

<https://doi.org/10.25686/2306-2827.2024.3.82>

EDN: UJSDSI

Forecast of Radioactive Contamination of Agricultural and Forestry Products on Former Agricultural Lands of the Bryansk Region**A. N. Perevolotsky** , **T. V. Perevolotskaya**, **I. E. Titov**, **O. A. Shubina**Russian Institute of Radiology and Agroecology
of National Research Centre “Kurchatov Institute”,
1/1, Kievskoe shosse, Obninsk, 249035, Russian Federation
forest_rad@mail.ru 

Abstract. *Introduction.* Radioactive contamination of the environment due to the accident at the Chernobyl nuclear power plant led to restrictions on farming on a significant area in Russia, Belarus and Ukraine. Despite the fact that more than 30 years have passed since the accident, 16 thousand hectares of agricultural land in the Bryansk region are still categorized as lands excluded from use, and the problem of their rational use remains relevant. *The purpose of the study* is to forecast the distribution of former agricultural lands across zones of radioactive contamination and soil groups, as well as predict the specific activity of ^{137}Cs in agricultural and forestry products grown in this area. *Objects and methods.* A forecast assessment of the distribution of former agricultural lands across zones of radioactive contamination and soil groups over 30 years was carried out based on the analysis of information from the database containing the results of a radiological survey of former agricultural lands of the Bryansk region. The forecasting of ^{137}Cs content was performed with regard to several types of products of agriculture (winter rye grains, potato tubers, milk) and forestry (averaged mushroom basket, barked and unbarked wood of Scots pine and English oak) based on the coefficients of transfer (proportionality). *Results.* It was found that in 2024 ~46 % of former agricultural lands on sod-podzolic soils are characterized by a density of ^{137}Cs soil pollution from 555 to 1480 kBq/m². By 2055, 54 % of lands will move to the zone with a density of ^{137}Cs pollution of 185–555 kBq/m² and ~16 % of lands – to the zone with that of 37–185 kBq/m². Winter rye grain compliant with the permissible standard for the content of ^{137}Cs can be obtained on an area of 2.3 thousand hectares in 2024 and 6.1 thousand hectares in 2055. Growing potatoes and obtaining feed for dairy cattle with an acceptable content of ^{137}Cs is possible on sod-podzolic sandy and sandy loam soils with a density of ^{137}Cs contamination <555 kBq/m² (3.8 thousand hectares), while on light and medium loamy soils – with a ^{137}Cs contamination density <1480 kBq/m² (5.7 thousand hectares). Forest mushrooms continue to be a critical food product in terms of ^{137}Cs concentrations. The standard for the content of this radionuclide can be exceeded at a pollution density of sod-podzolic sandy and sandy loam soils of 37 kBq/m², and on loamy soils – with a density of pollution of up to 185 kBq/m². One of the effective ways to use lands withdrawn from agricultural use is to transfer them to the forest fund for subsequent planting of forest crops or promoting natural reforestation.

Keywords: radioactive contamination; specific activity; radionuclides; pollution density; food; mushrooms; wood

Funding: the work was carried out within the framework of the state assignment for the NRC “Kurchatov Institute” – RIRAE.

For citation: Perevolotsky A. N., Perevolotskaya T. V., Titov I. E., Shubina O. A. Forecast of Radioactive Contamination of Agricultural and Forestry Products on Former Agricultural Lands of the Bryansk Region. *Vestnik of Volga State University of Technology. Ser.: Forest. Ecology. Nature Management.* 2024;(3):82–93. (In Russ.). <https://doi.org/10.25686/2306-2827.2024.3.82>; EDN: UJSDSI

REFERENCES

1. Alexakhin R. M., Buldakov L. A., Gubanov V. A. et al. Large radiation accidents: consequences and protective countermeasures. Ilyin L. A., Gubanov V. A. (Eds.). Moscow: Izdat Publ.; 2001. 752 p. EDN: YRWNXC (In Russ.).
2. Anisimov V. S., Geraskin S. A., Geshel I. V. et al. Radioecological consequences of the Chernobyl accident: biological effects, migration, rehabilitation of contaminated areas. Sanzharova N. I., Fesenko S. V. (Eds.). Moscow: RAS; 2018. 278 p. EDN: XUBZYT (In Russ.).

3. Aleksakhin R. M., Vasil'ev A. V., Dikarev V. G. et al. Agricultural radioecology. Aleksakhin R. M., Korneev N. A. (Eds.). Moscow: Ekologiya, 1992. 400 p. (In Russ).
4. Miarzlova O. A., Shapsheeva T. P. Comprehensive assessment of the possibility of returning the lands subjected to radioactive contamination into agricultural production. *Radiation Biology. Radioecology*. 2018;58(5):535–547. DOI: 10.1134/S0869803118050119; EDN: VKYOBT (In Russ)
5. Romanov G. N. Elimination of the consequences of radiation accidents: reference guide. Moscow: IzdAT Publ.; 1993. 336 p. (In Russ).
6. Ipat'ev V. A., Baginskii V. F., Bulavik I. M. et al. Forest. Man. Chernobyl. Forest ecosystems after the Chernobyl accident. Forest ecosystems after the accident at the Chernobyl nuclear power plant: their state, prognosis, population response, and ways of rehabilitation. Ipat'ev V. A. (Ed.). Gomel: Institute of Forest of the National Academy of Sciences of Belarus; 1999. 454 p. (In Russ).
7. Generic models for use in assessing the impact of discharges of radioactive substances to the environment. *Safety Reports Series No. 19*. Vienna: IAEA; 2001. 229 p.
8. Methodological guidelines MG2.6.1.3806-22. The forecast of doses of population exposure to cesium-137 when it enters the environment. Methodological guidelines. Moscow: Rospotrebnadzor, 2022. 9 p. (In Russ).
9. Behavior of radionuclides in the environment II. Chernobyl. Konoplev A., Kato K., Kalmykov S. (Eds.). Singapore: Springer; 2020. 443 p. DOI: 10.1007/978-981-15-3568-0
10. Behavior of radionuclides in the environment III. Fukushima. Nanda K., Konoplev A., Wada T. (Eds.). Singapore: Springer; 2022. 510 p. DOI: 10.1007/978-981-16-6799-2
11. Quantification of radionuclide transfer in terrestrial and freshwater environments for radiological assessments (IAEA-TECDOC-1616). Vienna: International Atomic Energy Agency, 2009. 616 p.

The article was submitted 20.06.2024; approved after reviewing 28.08.2024;
accepted for publication 20.09.2024

Information about the authors

Alexander N. Perevolotsky – Doctor of Biological Sciences, Leading Researcher at the Laboratory of Mathematical Modeling and Software & Information Support, Russian Institute of Radiology and Agroecology of National Research Centre “Kurchatov Institute”. Research interests – radiation ecology of the environment, computational methods of dosimetry. Author of 250 scientific publications including four monographs. ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-6913-7609>; SPIN: 1469-3199

Tatyana V. Perevolotskaya – Candidate of Biological Sciences, Associate Professor, Senior Researcher at the Laboratory of Mathematical Modeling and Software & Information Support, Russian Institute of Radiology and Agroecology of National Research Centre “Kurchatov Institute”. Research interests – radiation ecology of the environment, computational methods of dosimetry. Author of 200 scientific publications including two monographs. ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-8250-5536>; SPIN: 4562-3671

Igor E. Titov – Researcher at the Laboratory of Mathematical Modeling and Software & Information Support, Russian Institute of Radiology and Agroecology of National Research Centre “Kurchatov Institute”. Research interests – radiation ecology of the environment, geoinformatics. Author of 200 scientific publications including four monographs. SPIN: 2589-2233

Olga A. Shubina – Candidate of Biological Sciences, Deputy Director for Scientific Work, Russian Institute of Radiology and Agroecology of National Research Centre “Kurchatov Institute”. Research interests – radiation ecology of the environment, methods of rehabilitation of radioactively contaminated areas. Author of 250 scientific publications including four monographs. SPIN: 7036-8172

Contribution of the authors: all authors made an equivalent contribution to the paper preparation.

Conflict of interests: the authors declare no conflict of interest.
All authors read and approved the final manuscript