

УДК 539.163:631.45:631.95:614.876

ДИНАМИКА КОЭФФИЦИЕНТОВ ПЕРЕХОДА ^{137}Cs В СЕЛЬСКОХОЗЯЙСТВЕННУЮ ПРОДУКЦИЮ ПОСЛЕ АВАРИИ НА ЧАЭС: ЗЕРНО, КАРТОФЕЛЬ И ОВОЩИ

© 2023 г. С. В. Фесенко^{1,*}, П. В. Прудников², Е. С. Емлютина¹, И. Э. Епифанова¹, И. Е. Титов¹,
О. А. Шубина¹

¹ Всероссийский научно-исследовательский институт радиологии и агроэкологии, Обнинск, Россия

² Центр химизации и сельскохозяйственной радиологии “Брянский”,
Брянск, п. Мичуринский, Брянская область, Россия

*E-mail: Corwin_17F@mail.ru

Поступила в редакцию 18.07.2022 г.

После доработки 28.11.2022 г.

Принята к публикации 21.12.2022 г.

Представлены результаты анализа изменения коэффициентов перехода (K_p) ^{137}Cs в продукцию растениеводства (зерно, картофель и овощи) в районах Брянской области, пострадавших после аварии на ЧАЭС. Коэффициенты перехода в год выпадений, так же, как и динамика K_p в последующем, существенно зависели от исходного плодородия почв, подвергшихся загрязнению. Коэффициенты перехода ^{137}Cs в продукцию в районах с более высоким плодородием были в 3–8 раз (в зависимости от вида растений) ниже, чем в районах с низким агрофоном, а наиболее значительные различия отмечены для зерновых. Снижение K_p носило неравномерный характер. Рассчитаны периоды полуснижения коэффициентов перехода за период с 1986 по 2021 г. Показано, что первые периоды полуснижения, рассчитанные для периода интенсивного проведения агрохимических мероприятий (1987–1991), составили от 0.7 до 1.4 года. Вторые периоды полуснижения варьировали: для зерна от 7.3 до 17.3 года. В некоторых районах после сильного снижения концентраций ^{137}Cs в продукции после 1994 г. отмечен медленный рост K_p ^{137}Cs в зерно, что объясняется недостаточной компенсацией снижения плодородия почв геохимическим связыванием ^{137}Cs в почве. В последующем динамика загрязнения продукции определялась разнонаправленными процессами, т.е. увеличением поступления ^{137}Cs в растения, которое компенсировалось естественным снижением биологической доступности радионуклидов в почвах под действием геохимических процессов. В районах с интенсивным применением контрмер в сельском хозяйстве уменьшение K_p в сельскохозяйственную продукцию определялось в большей степени влиянием защитных мероприятий. В районах с ограниченным применением контрмер преобладающий вклад в снижение K_p вносили естественные биогеохимические процессы, определяющие связывание радионуклидов почвенно-поглощающим комплексом. Отмечены ограничения в применении подхода, основанного на оценке периодов полуснижения, и необходимость использования истории применения агрохимических мероприятий, а также исходного агрофона для прогноза поступления ^{137}Cs в растения.

Ключевые слова: Чернобыльская АЭС, коэффициент перехода, сельскохозяйственная продукция, юго-западные районы Брянской области, мониторинг в сельском хозяйстве, ^{137}Cs

DOI: 10.31857/S0869803123020042, EDN: EOQNHJ

Ликвидация последствий аварии на ЧАЭС в сельском хозяйстве потребовала выполнения многолетних радиоэкологических исследований по оценке закономерностей поведения радионуклидов в разнообразных условиях окружающей среды [1–5]. Для решения задач, связанных со смягчением последствий аварии в АПК загрязненных регионов, в России была создана система радиационного контроля и мониторинга сельскохозяйственных объектов, и проведено ее техническое оснащение. Было выполнено более 250 тыс. измерений содержания ^{137}Cs в продукции расте-

ниеводства (включая корма для животных) и более 1 млн измерений содержания радионуклидов в продукции животноводства. Внедрение программ радиационного мониторинга позволило принять оперативные меры по переработке продукции, не соответствующей нормативам, и предложить стратегии защитных мероприятий, обеспечивающих максимальный эффект от их внедрения. В то же время объемы и сроки проведения мониторинга различных видов продукции существенно отличались в зависимости от необходимости в их контроле. Период мониторинга

содержания ^{137}Cs в овощах и картофеле охватывал 21 год после аварии, тогда как измерения содержания ^{137}Cs в зерне и кормовых культурах продолжались до 2021 г.

Начиная с 1986 г. в пострадавших районах широко применялись агрохимические мероприятия, направленные на снижение поступления ^{137}Cs в сельскохозяйственную продукцию. Площади сельскохозяйственных угодий, на которых проводились работы, постоянно увеличивались, достигнув к 1991 г. 7700 тыс. га [4, 5]. Проводимые мероприятия оказали существенное влияние на поступление радионуклидов в сельскохозяйственную продукцию, являясь важным фактором, определяющим динамику коэффициентов перехода (K_p) из почвы в растения в этот период времени [1]. В настоящее время объемы проведения мониторинга в районах, пострадавших после аварии на ЧАЭС, существенно снизились и проводятся в очень ограниченных масштабах, а параметры биологической доступности ^{137}Cs стабилизировались и не наблюдается их существенных изменений [10].

Для проведения настоящих исследований была создана база данных по концентрациям ^{137}Cs в сельскохозяйственной продукции, содержащая информацию, накопленную за 35 лет, прошедших после аварии на Чернобыльской АЭС. Выполнен анализ динамики изменения содержания этого радионуклида в продукции растениеводства: зерне, картофеле, овощах [11, 12]. Это позволило выявить факторы, определяющие интенсивность поступления ^{137}Cs в продукцию растениеводства, и дать прогноз ее загрязнения в отдаленный период после аварии на Чернобыльской АЭС [11]. В то же время при обобщении этих данных не учитывалась плотность загрязнения сельскохозяйственных угодий, что ограничивает их ценность для сравнения с информацией, полученной в других регионах.

К числу основных параметров, используемых для прогнозирования содержания радионуклидов в продукции сельского хозяйства, относятся коэффициенты перехода радионуклида из почвы в растения (K_p). В наших предыдущих работах представлены данные по динамике K_p в основные виды растений и продукции растениеводства на основе информации, полученной в период с 1987 по 1992 г. [1–4, 6, 7]. Показано, что естественное (без применения защитных мероприятий) снижение коэффициентов перехода носило неравномерный характер и описывалось, в большинстве случаев, двухкомпонентной моделью. При этом точность оценки второй компоненты была довольно низкой, что ограничивало использование этих данных для долгосрочных прогнозов радиоактивного загрязнения продукции.

Целью исследования, представленного в настоящей статье, являлся анализ наблюдающихся

на протяжении более чем 30-летнего периода после аварии на Чернобыльской АЭС закономерностей изменения K_p ^{137}Cs в зерно, картофель и овощи. Предполагается, что данная статья будет дополнена публикациями, представляющими аналогичные данные о коэффициентах перехода ^{137}Cs в кормовые культуры, молоко и мясо, завершая цикл многолетних исследований по закономерностям миграции этого радионуклида в сельскохозяйственных пищевых цепочках.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДИКА

Используемые данные

Для оценки K_p ^{137}Cs в продукцию растениеводства (зерно, картофель и овощи) использовали данные мониторинга, проводимого центром Агрохимрадиология “Брянский” в юго-западных районах Брянской области: Гордеевском, Злынковском, Климовском, Клинцовском, Красnogорском, Новозыбковском и Стародубском [11, 16]. В рамках этих работ в период с 1986 по 2021 г. отбирали основные виды продукции растениеводства, включая зерно, картофель и овощи, производимые в хозяйствах, находящихся на загрязненной территории. Объемы проведения мониторинга содержания ^{137}Cs в продукции в различные периоды времени после аварии на Чернобыльской АЭС были не одинаковы (рис. 1).

Информация, использованная для оценки коэффициентов перехода, содержала более 30 тыс. значений концентрации ^{137}Cs в зерне, измеренных в период с 1986 по 2021 г., более 9 тыс. в картофеле, измеренных с 1986 по 2007 г. и более 5 тыс. в овощах, измеренных с 1986 по 2010 г. [11, 16].

Наибольшее количество проб растениеводческой продукции при проведении мониторинга было отобрано в 1986–1993 гг. В этот период наблюдалось и наиболее активное применение защитных мероприятий в сельском хозяйстве.

Наряду с радиационным мониторингом загрязнения сельскохозяйственной продукции, в юго-западных районах Брянской области Брянским центром “Агрохимрадиология” проведено несколько циклов детального обследования плотности загрязнения ^{137}Cs почв сельскохозяйственных земель. Это позволило определить коэффициенты перехода этого радионуклида в растения и сельскохозяйственную продукцию.

Для расчета коэффициентов перехода использовали результаты всех обследований, проведенных до 2021 г. При этом данные каждого обследования пересчитывали к плотности загрязнения почв 1986 г. В качестве оценки плотностей загрязнения в настоящей работе использовали средние геометрические значения, рассчитанные по данным всех туров обследования [16, 17].

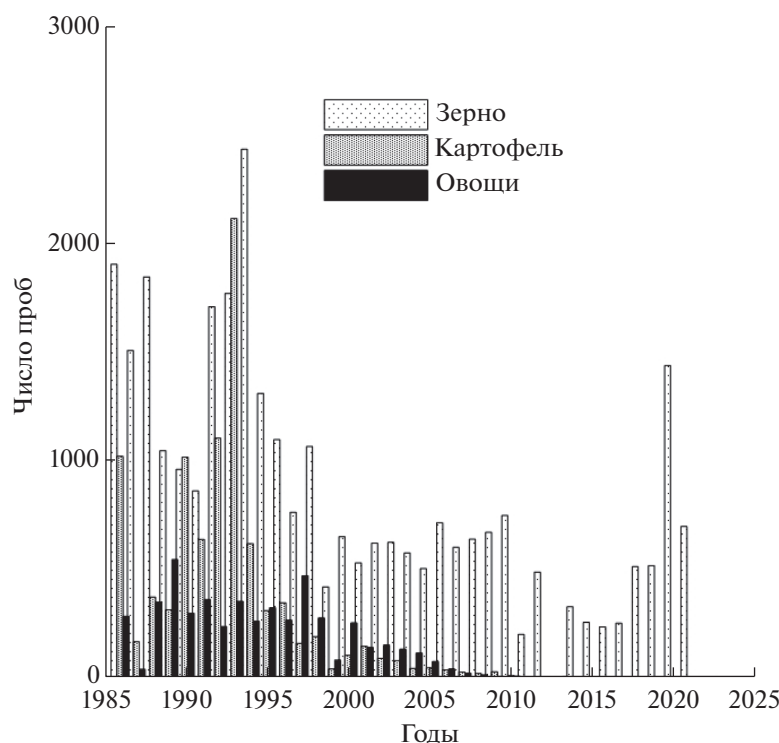


Рис. 1. Число проб зерна, картофеля и овощей, отобранных в юго-западных районах Брянской области в 1986–2021 гг. [11].
Fig. 1. Number of grains, potato and vegetable samples taken in the southwestern districts of Bryansk Region in 1986–2021 [11].

Параметры

По определению, агрегированный коэффициент перехода (K_n) представляет собой отношение

концентрации радионуклидов в продукции (Бк/кг) к плотности загрязнения почвы, на которой эта продукция получена (кБк/м²) [2].

$$K_n(t) = \frac{\text{Концентрация радионуклида в продукции, Бк/кг}}{\text{Плотность загрязнения почвы, кБк/м}^2} \quad (1)$$

Периоды полуснижения коэффициентов перехода ($T_{1/2}$) рассчитывали как промежуток времени, в течение которого K_n в выделенные виды продукции под влиянием всех факторов уменьшается в 2 раза [2, 3]. Таким образом, для оценки периодов полуснижения K_n использовали следующее выражение:

$$K_n(t) = K_n(t_k) \times e^{-\lambda \times t}, \quad T_{1/2} = \frac{0.693}{\lambda}. \quad (2)$$

Реабилитационные мероприятия

В рассматриваемый период времени (1986–2021 гг.) на динамику изменения коэффициентов перехода ^{137}Cs в сельскохозяйственную продукцию значительное влияние оказывали агрохимические мероприятия, проводимые в загрязненных районах в рамках союзных и федеральных программ по преодолению последствий аварии

на Чернобыльской АЭС [5, 6]. Особенно интенсивно мероприятия применялись в первые годы после Чернобыльской аварии [1–5, 11, 12]. В этот период в качестве основной защитной меры, обеспечивающей снижение поступления цезия в зерновые и пропашные культуры, применяли повышенные дозы минеральных удобрений. Дополнительные дозы калийных удобрений на пашне составляли: в 1986–1990 гг. 56 кг/га K_2O [4, 11, 16]. Начиная с 1991 г. в хозяйствах загрязненных районов Брянской и других областей объемы проведения этих мероприятий начали снижаться, а применение удобрений на 1 га пашни в этих районах уменьшилось до 8 раз. Более детальное описание проведения защитных мероприятий в АПК в период после аварии на Чернобыльской АЭС представлено в публикациях [5, 8, 9, 11, 16].

Таблица 1. Геометрические средние содержания ^{137}Cs в продукции растениеводства, нормированные на плотность выпадений на момент уборки, произведенной в 1986 г. в юго-западных районах Брянской области**Table 1.** Geometric means of ^{137}Cs concentrations in crops normalized to the deposition density at the time of harvesting performed in 1986 in the southwestern districts of the Bryansk region

Районы	Плотность выпадений на пашне, кБк/м^2	Концентрация ^{137}Cs , нормированная на плотность выпадений, $(\text{Бк/кг})/(\text{кБк/м}^2)$		
		зерно	картофель	овощи
Гордеевский	366 ± 24	2.6	0.19	0.34
Злынковский	361 ± 31	0.48	0.26	0.44
Климовский	156 ± 20	2.2	0.51	0.58
Клинцовский	232 ± 31	2.6	1.76	0.67
Красногорский	321 ± 90	4.3	0.96	0.29
Новozyбковский	526 ± 10	0.26	0.19	0.27

КОНЦЕНТРАЦИИ ^{137}Cs В ПРОБАХ ЗЕРНА, КАРТОФЕЛЯ И ОВОЩЕЙ В 1986 ГОДУ

Коэффициенты перехода ^{137}Cs в продукцию для 1986 г. можно классифицировать как K_p в какой-то мере условно, поскольку загрязнение продукции было связано с аэральным загрязнением растений, а также пылеобразованием при уборке. В то же время, рассматривая K_p как интегральный параметр, обобщающий все пути поступления, мы использовали этот параметр для всего периода наблюдений, включая 1986 г.

Данные по коэффициентам перехода ^{137}Cs в рассматриваемые виды сельскохозяйственной продукции приведены в табл. 1. Количество измерений, использованных для оценки K_p 1986 г., составило более 100 тыс. проб почвы, 1907 проб зерна, 1024 проб картофеля и 286 проб овощей.

Максимальные геометрические средние значения K_p ^{137}Cs в зерно в 1986 г. ($4.3 (\text{Бк/кг})/(\text{кБк/м}^2)$) отмечены в Красногорском районе. Высокие и довольно близкие значения ($2.2\text{--}2.6 (\text{Бк/кг})/(\text{кБк/м}^2)$) зафиксированы в Гордеевском, Клинцовском и Климовском районах, а минимальные, примерно в 10 раз ниже, в Новозыбковском и Злынковском районах. Различия между загрязненными районами в меньшей степени отмечались для картофеля и овощей. Наибольшие значения K_p в картофель и овощи были зарегистрированы в Клинцовском районе, а минимальные значения были характерны для Новозыбковского района. При этом следует отметить отсутствие явной зависимости загрязнения зерна и картофеля от плотности выпадений.

Полученные оценки показывают, что K_p для ^{137}Cs в зерно, рассчитанные для Злынковского и Новозыбковского районов (0.26 и $0.48 (\text{Бк/кг})/(\text{кБк/м}^2)$), статистически достоверно отличаются от коэффициентов перехода, рассчитанных для остальных четырех районов, находящихся в диапазоне

от 2.2 до $4.3 (\text{Бк/кг})/(\text{кБк/м}^2)$. Следует также отметить, что коэффициенты перехода для различных видов продукции растениеводства, производимых в этих районах, довольно близки и находятся в диапазоне от 0.19 до $0.48 (\text{Бк/кг})/(\text{кБк/м}^2)$. К основным отличиям между районами относятся уровни плодородия почв пахотных земель.

Сравнивая агрохимическую характеристику почв Злынковского и Новозыбковского районов с другими юго-западными районами Брянской области (Гордеевским, Климовским, Клинцовским и Красногорским), необходимо отметить высокий достигнутый уровень плодородия почв в этих двух районах. В почвах пахотных земель этих районов средневзвешенное содержание подвижного калия составляло 180 и 174 мг/кг , подвижного фосфора 193 и 215 мг/кг , а степень кислотности (pH_{KCl}) 6.1 и 5.9 соответственно. Такие уровни содержания основных элементов питания в почвах обеспечивали бездефицитный баланс калия, кальция и фосфора в почвенном растворе, что в значительной степени снижало переход ^{137}Cs в растения.

Исходя из этого критерия районы были разделены на две группы: Гордеевский, Климовский, Клинцовский, Красногорский районы (группа 1) и Злынковский (с 1959 до 1988 г. был в составе Новозыбковского района), Новозыбковский районы (группа 2). При этом необходимо отметить, что коэффициенты перехода ^{137}Cs в зерно Новозыбковского и Злынковского районов, рассчитанные по состоянию на 1986 г., статистически отличаются от коэффициентов перехода, оцененных для остальных районов. Вследствие этого оценки статистических характеристик коэффициентов перехода в зерно, картофель и овощи в 1986 г. были сделаны как для территории радиоактивного загрязнения в целом, так и отдельно для двух групп выделенных районов (табл. 2).

Таблица 2. Статистические параметры содержания $K_p^{137}\text{Cs}$ в продукцию растениеводства, рассчитанные на момент уборки в 1986 г., (Бк/кг)/(кБк/м²)

Table 2. Statistical parameters of ^{137}Cs T_{ag} to plant products, calculated for the time of harvest in 1986, (Bq/kg)/(kBq/m²)

Районы	N	Среднее	Статистическое отклонение	Геометрическое среднее	Медиана	95%-ные доверительные интервалы	
						нижний	верхний
Зерно							
1 группа	49	3.00	1.71	2.6	2.35	2.52	3.47
2 группа	25	0.38	0.22	0.33	0.32	0.28	0.35
Все районы	74	2.1	1.9	1.3	1.7	1.69	2.54
Картофель							
1 группа	51	0.81	0.63	0.60	0.65	0.64	0.99
2 группа	25	0.23	0.10	0.21	0.22	0.19	0.28
Все районы	76	0.62	0.58	0.43	0.38	0.49	0.76
Овощи							
1 группа	37	0.56	0.35	0.46	0.51	0.44	0.68
2 группа	17	0.38	0.19	0.33	0.32	0.25	0.78
Все районы	54	0.50	0.32	0.42	0.42	0.41	0.59

Авария на Чернобыльской АЭС произошла в конце апреля 1986 г. до начала посадок картофеля и овощей. Яровые зерновые и зернобобовые культуры были высеяны не на всей планируемой площади, а около 70% посевных площадей зерновых культур в юго-западных районах Брянской области составляли озимые, механизмы загрязнения которых в 1986 г. отличались от механизмов загрязнения яровых зерновых культур, картофеля и овощей. В первый год после аварии корневое поступление в озимые растения было возможно только из верхнего горизонта почвы, тогда как в яровые и пропашные культуры поступление радионуклидов происходило из всего пахотного слоя. Вследствие этого параметры перехода ^{137}Cs в зерно озимых культур отличались от параметров загрязнения, характерных для яровых, а доля озимых в урожае существенно может отражаться на средних характеристиках загрязнения урожая.

Среднее значение $K_p^{137}\text{Cs}$ в зерно, производимое в юго-западных районах Брянской области, было примерно в 5 раз выше, чем в картофеле и в 6 раз, чем в овощах. Эти отношения значительно варьировали в зависимости от района и менялись от 14.8 — (отношение K_p для зерна к K_p для овощей) в Красногорском районе до 0.96 — в Новозыбковском районе.

Во всех рассмотренных случаях средние значения были больше медианы и геометрического среднего, а коэффициент вариации данных варьировал от 0.5 до 0.9. Это позволяет сделать вывод, что распределение этого параметра носят для рассмотренных ситуаций асимметричный характер, что определяет необходимость использовать логнормальное распределение для вероятност-

ных оценок загрязнения сельскохозяйственной продукции.

Полученные результаты имеют важное значение для практики аварийного реагирования и могут быть использованы для анализа широкого спектра сценариев загрязнения окружающей среды. Для оценки K_p в год радиоактивных выпадений в регионах с плодородными почвами и достаточно высоким уровнем земледелия для прогнозирования загрязнения продукции растениеводства можно предложить значение 0.33 (Бк/кг)/(кБк/м²) для всех рассматриваемых видов продукции. Для регионов с низким плодородием целесообразно использовать более высокие оценки, полученные для группы, включающей Гордеевский, Климовский, Клиновский и Красногорский районы, а именно, 2.6, 0.6 и 0.46 (Бк/кг)/(кБк/м²) для зерна, картофеля и овощей соответственно. Для консервативных оценок в обоих случаях можно использовать верхние доверительные интервалы, приведенные в табл. 2.

Периоды полуснижения коэффициентов перехода ^{137}Cs в продукцию растениеводства

Периоды полуснижения коэффициентов перехода ^{137}Cs в зерно и картофель и овощи, производимые в юго-западных районах Брянской области в период с 1987 по 2021 г., приведены в табл. 3. Для зерна можно выделить три временных интервала, периоды полуснижения между которыми статистически различны (рис. 1): с 1987 по 1990 г., с 1991 по 2010 г. и с 2011 по 2021 г. Первый период охватывает промежуток времени, когда агрохимические мероприятия применялись в постоянно

Таблица 3. Периоды полуснижения $K_{\text{п}}^{137}\text{Cs}$ в основные виды продукции растениеводства в юго-западных районах Брянской области
Table 3. Half-lives of ^{137}Cs T_{ag} to major crops produced in the southwestern districts of the Bryansk region

Районы	$T_{1/2}^1$, годы	R^2	$T_{1/2}^2$, годы	R^2	$T_{1/2}^3$, годы	R^2
Зерно						
Гордеевский	0.7	0.96	–10.4 (1991–2011)	0.63	14.7 (2012–2020)	0.46
Злынковский	1.7	0.78	13.5 (1991–2020)	0.68		
Климовский	0.8	0.91	17.3 (1991–2017)	0.54		
Клинцовский	0.8	0.36	–20.4 (1991–2007)	0.39	6.9 (2008–2020)	
Красногорский	0.8	0.87	–18.5 (1991–2011)	0.28	17.4 (2012–2020)	0.26
Новozyбковский	1.3	0.92	7.5 (1991–2003)	0.88	–17.3 (2004–2020)	0.36
Стародубский			23.9 (1995–2020)	0.7		
Картофель						
Гордеевский	1.1	0.90	4.1 (1991–1997)	0.91	12.8 (1997–2007)	0.85
Злынковский	0.7	0.96	20.6 (1991–2006)	0.18		
Климовский	0.7	0.95	7.4 (1991–2005)	0.38		
Клинцовский	0.7	0.77	7.4 (1991–2007)	0.42		
Красногорский	2.4	0.86	14.7 (1991–2003)	0.62		
Новozyбковский	2.3	0.82	16.2 (1991–2006)	0.56		
Овощи						
Злынковский	1.0	0.91	8.5 (1991–2004)	0.41		
Климовский	0.8	0.69	43 (1991–2007)	0.21		
Клинцовский	0.9	0.99	18.2 (1991–2007)	0.49		
Новozyбковский	1.4	0.86	16.5 (1991–2007)	0.57		

¹Период полуснижения рассчитан на основе данных для 1987–1990 гг.

увеличивающих масштабах, второй, когда объемы их проведения ограничивались относительно небольшим количеством “критических” хозяйств, и третий период, когда эффект от мероприятий был практически нивелирован, а снижение загрязнения продукции определялось главным образом естественным снижением биологической доступности ^{137}Cs в почве и радиоактивным распадом.

Первые периоды (1987–1990 гг.) полуснижения $K_{\text{п}}^{137}\text{Cs}$ в зерно, картофель и овощи довольно близки и находятся в большинстве случаев в диапазоне от 0.7 до 1.0 года. Более длинные периоды 1.3–2.4 отмечены для Новozyбковского и Злынковского районов (зерно). Отмеченные расхождения, по-видимому, связаны с различиями в уровнях плодородия почв, сложившихся в этих районах к 1986 г., поскольку на более бедных почвах Гордеевского, Красногорского и Клинцовского районов применение больших доз мине-

ральных удобрений давало больший эффект, чем на более плодородных почвах Новozyбковского района.

Снижение $K_{\text{п}}^{137}\text{Cs}$ в зерно замедлилось во всех районах после 1991 г., а периоды полуснижения (с 1991 по 2011 г.) в большинстве случаев находятся в диапазоне от 7.4 до 17.3 года. В Стародубском районе проведение мониторинга продукции растениеводства было начато в 1993 г., что позволяет оценить только второй период полуснижения коэффициентов перехода, который оказался равным 23.9 годам. В этот период особое значение приобретает зависимость поступления радионуклидов от погодных условий, поскольку в зависимости от погодных условий конкретного года коэффициенты перехода из почвы в растения могут изменяться до 5 раз [1, 4]. Этим во многом объясняются высокая вариабельность $K_{\text{п}}^{137}\text{Cs}$ в продукции и недостаточно высокие значения R^2 в усло-

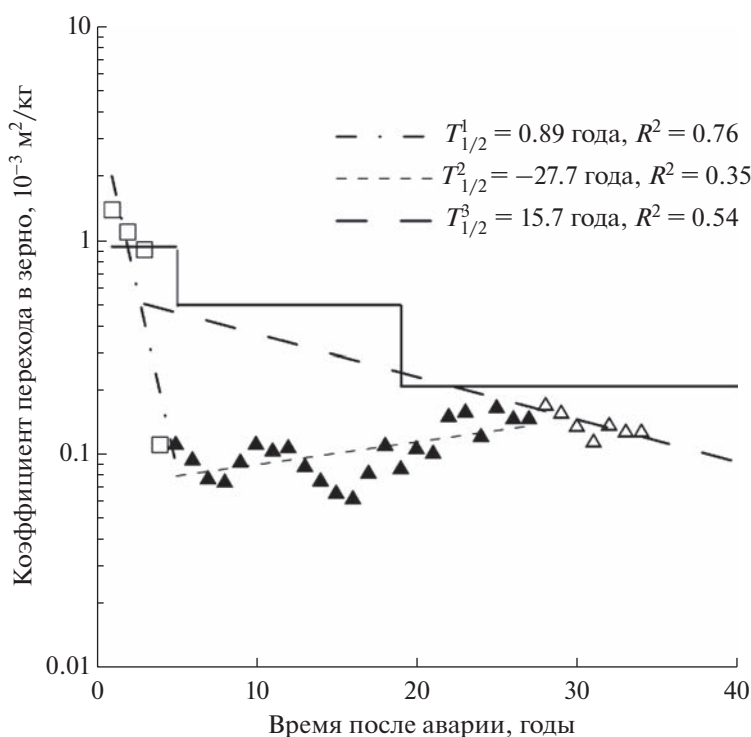


Рис. 2. Динамика снижения коэффициентов перехода ^{137}Cs в зерно юго-западных районов Брянской области после аварии на Чернобыльской АЭС. Сплошная линия показывает значения K_p , приведенные в рекомендациях по ведению АПК и периоды их применения.

Fig. 2. Dynamics of ^{137}Cs aggregated transfer factor values (T_{ag}) to grain of the south-western districts of the Bryansk region after the Chernobyl accident. The solid line shows the T_{ag} values given in the recommendations for the agriculture and the periods of their application.

виях, когда влияние других факторов незначительно, либо они компенсируют друг друга.

Закономерности динамики K_p ^{137}Cs в продукцию растениеводства

Обобщенные данные по динамике коэффициентов перехода ^{137}Cs в зерно, картофель и овощи представлены на рис. 2–4.

Также на этих рисунках приводятся значения K_p , предложенные для прогнозирования поступления ^{137}Cs в продукцию в различные периоды времени после аварии на Чернобыльской АЭС (табл. 4). Первые (временные) рекомендации по ведению агропромышленного производства в Белорусской ССР на территории, подвергшейся радиоактивному загрязнению, были изданы ВНИИРАЭ (на тот момент времени ВНИИСХР) уже в середине 1986 г. [18] (табл. 4). В этих рекомендациях были представлены значения коэффициентов перехода для второго года после аварии и на последующий период до 1991 г. (рис. 2–4). Для оценки коэффициентов перехода использовались радиоэкологические данные исследований, выполненные на глобальных выпадениях и в зоне аварии на Южном Урале. В последующем

значения коэффициентов перехода уточнялись на основе текущей информации [18–21].

В 1991 г. вышли Рекомендации по ведению сельского хозяйства в условиях радиоактивного загрязнения территории в результате аварии на Чернобыльской АЭС на период 1991–1995 гг., которые содержали уточненные значения коэффициентов перехода, актуальные на начало 90-х годов, которые и использовались в восстановительный период после аварии на Чернобыльской АЭС [19].

В 2005 г. ВНИИРАЭ опубликовал Руководство по ведению сельскохозяйственного производства на радиоактивно загрязненных территориях Республики Беларусь и Российской Федерации, которые также включали рекомендации по выбору K_p в продукцию растениеводства в отдаленный период после аварии на Чернобыльской АЭС [20].

Во всех этих документах были предложены значения коэффициентов перехода для почв различного механического состава, что позволяло проводить их более точную адаптацию к условиям загрязненных регионов (табл. 4). Для сравнения с данными мониторинга на рис. 2–4, данные табл. 4 были пересчитаны на основе данных руко-

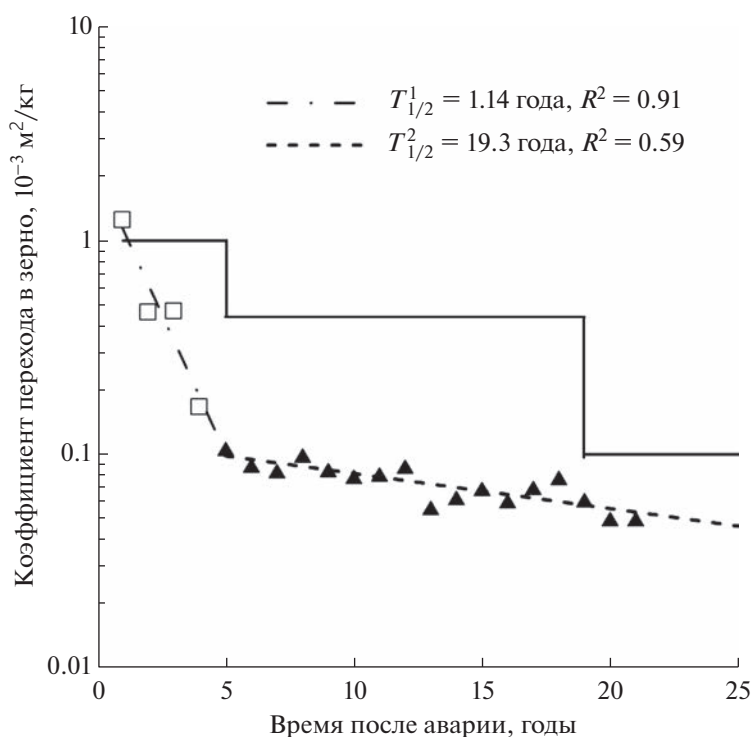


Рис. 3. Динамика снижения коэффициентов перехода ^{137}Cs в картофель юго-западных районов Брянской области после аварии на Чернобыльской АЭС. Сплошная линия показывает значения K_{tr} , приведенные в рекомендациях по ведению АПК и периоды их применения.

Fig. 3. Dynamics of ^{137}Cs transfer factors reduction in potatoes of south-western districts of Bryansk region after the Chernobyl accident. The solid line shows the T_{ag} values given in the recommendations for the agriculture and the periods of their application.

водств [18–20] с учетом почвенных характеристик рассматриваемых районов [21].

Видно, что рекомендуемые значения в большинстве случаев, за исключением K_{tr} в зерно в 1987–1989 гг. и картофель в 1987 г., давали консервативную оценку содержания ^{137}Cs в продукции растениеводства, достаточно адекватно отражая динамику снижения K_{tr} . Так, в период с 1991 по 2005 г., использование параметров, предложенных в работе [19], в 5–7 раз превышали K_{tr} , представленные в настоящей работе. В первую очередь эти различия объяснялись тем, что активное применение агрохимических мероприятий позволило добиться существенного снижения загрязнения продукции, а также постепенным снижением коэффициентов перехода в результате сорбции цезия в почве. Результаты расчетов на основе K_{tr} , предложенных для отдаленного периода [20], когда влияние мероприятий нивелировалось, превышали реальные данные в 2–3 раза (рис. 4).

Динамика снижения коэффициентов перехода ^{137}Cs в продукцию растениеводства носила неравномерный характер. Можно выделить несколько периодов времени после аварии, когда

динамика снижения K_{tr} ^{137}Cs в продукцию существенно различалась. Активное проведение мероприятий, таких как известкование кислых почв и внесение повышенных доз минеральных удобрений способствовали быстрому снижению коэффициентов перехода в продукцию растениеводства. Другим фактором, способствующим уменьшению K_{tr} ^{137}Cs в продукцию, является снижение биологической доступности ^{137}Cs в результате необменной фиксации его в почвенном поглощающем комплексе [13–15]. Процесс сорбции ^{137}Cs обычно описывается двухкомпонентной экспоненциальной моделью [13–15], при этом первый период полуснижения после однократного загрязнения существенно короче второго периода,

Для первого периода времени характерны самые короткие периоды полуснижения K_{tr} ^{137}Cs в продукцию — от 0.8 (картофель) до 1.4 года (зерно). В целом эти данные согласуются с результатами более ранних оценок, приведенных в работах [2, 9, 13, 14, 22, 23].

Начиная с 1991 г. после аварии, объемы проведения защитных мероприятий существенно сократились, что непосредственно отразилось на темпах поступления ^{137}Cs в продукцию. Более то-

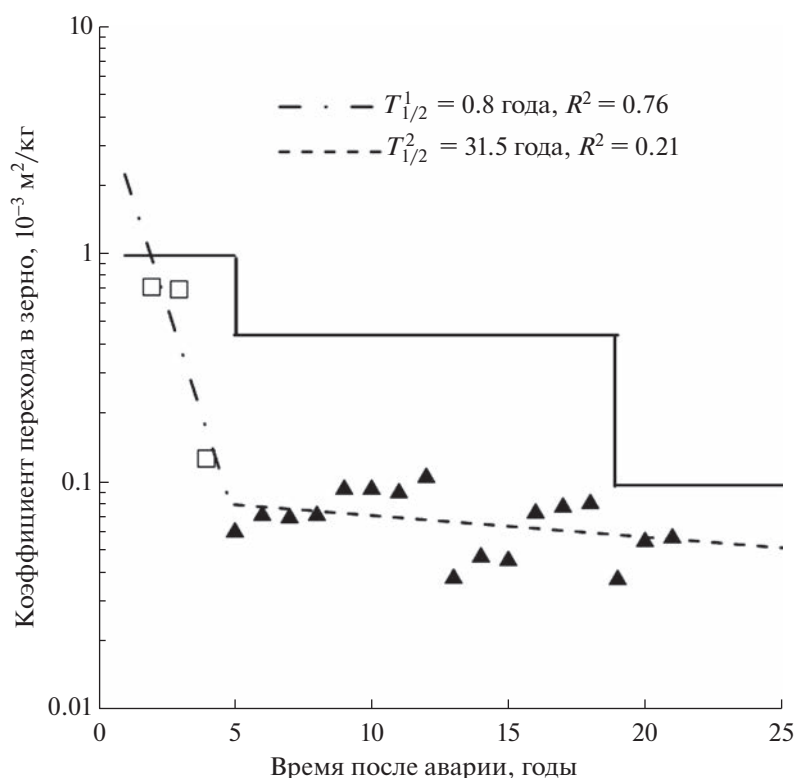


Рис. 4. Динамика снижения коэффициентов перехода ^{137}Cs в овощи юго-западных районов Брянской области после аварии на Чернобыльской АЭС. Сплошная линия показывает значения $K_{\text{п}}$, приведенные в рекомендациях по ведению АПК и периоды их применения.

Fig. 4. Dynamics of ^{137}Cs aggregated transfer factors to vegetables produced in the south-western districts of the Bryansk region after the Chernobyl accident. The solid line shows the T_{ag} values given in the recommendations for the agriculture and the periods of their application.

го, применение минеральных удобрений в низких дозах приводило к росту загрязнения сельскохозяйственной продукции выше уровня, характерного для применения оптимальных доз удобрений.

В этот период увеличение поступления ^{137}Cs в растения за счет ухудшения плодородия почв не могло компенсироваться естественным снижением биологической доступности радионуклида, что предопределяло общее увеличение коэффициентов перехода.

Внедрение мероприятий ФЦП “Сохранение и восстановление плодородия почв земель сельскохозяйственного назначения и агроландшафтов как национального достояния России на 2006–2013 годы” позволило в определенной степени приостановить снижение плодородия почв, а динамика уменьшения ^{137}Cs стала соответствовать параметрам естественного снижения поступления радионуклидов в растения [12].

В результате этих процессов снижение $K_{\text{п}}$ радионуклидов в продукцию сильно замедлилось, а период полуснижения, в зависимости от вида

продукции, составил 31.5 года для овощей, 19.3 года — для картофеля и 15.7 года — для зерна.

Следует отметить отличия в динамике поступления ^{137}Cs в зерновые культуры, картофель и овощи (рис. 2–4). В первую очередь это может быть связано с тем, что в основе системы удобрений зерновых культур лежит применение минеральных удобрений, особенно калийных удобрений, тогда как значительную долю в питании картофеля и корнеплодов играют органические удобрения и повышенные дозы применения калийных и фосфорных удобрений. Вследствие этого резкое снижение поставок минеральных удобрений в 1990-х годах в большей степени сказалось на обеспеченности элементами минерального питания зерновых культур, в меньшей степени — картофеля и овощей.

Полученные результаты позволяют выделить два типа динамики изменения коэффициентов перехода после аварии на Чернобыльской АЭС, примеры которых представлены на рис. 5 и 6.

К первому типу можно отнести динамику $K_{\text{п}}$, характеризующуюся сильным снижением в на-

Таблица 4. Значения коэффициентов перехода, рекомендованные для прогнозирования загрязнения урожая в различные периоды времени после аварии на ЧАЭС**Table 4.** Aggregated transfer factor values recommended for predicting crop contamination in different time periods after the Chernobyl accident

Год выхода	Культура	Часть урожая	Почвы – дерново-подзолистая: механический состав		
			песчаная	супесчаная	среднесуглинистая
1986 [18]	Пшеница озимая	Зерно	0.5	0.26	0.07
	Пшеница яровая	Зерно	1.5	0.7	0.17
	Рожь	Зерно	0.5	0.26	0.07
	Ячмень	Зерно	1.3	0.66	0.13
	Картофель	Клубнеплоды	1	0.7	0.19
	Овощи	Корнеплоды	1.3	1.65	0.29
1991 [19]	Пшеница озимая	Зерно	0.7	0.3	0.1
	Рожь озимая	Зерно	0.6	0.3	0.1
	Пшеница яровая	Зерно	0.9	0.5	0.17
	Ячмень	Зерно	0.8	0.6	0.2
	Картофель	Клубнеплоды	0.5	0.4	0.3
	Овощи	Корнеплоды	0.5	0.3	0.2
2005 [20]	Рожь озимая	Зерно	0.20		0.06
	Ячмень	Зерно	0.30		0.1
	Картофель	Клубнеплоды	0.10		0.05
	Овощи	Корнеплоды	0.15		0.1

чальный период, обусловленное интенсивным применением агрохимических мероприятий в районах с низким агрофоном. В этот период обеспеченность растений быстро достигает нормы и снижается существенно ниже потребности растений в элементах минерального питания. После практически полного прекращения применения минеральных удобрений наблюдается рост K_n до уровня обеспеченности растений элементами минерального питания в период времени до аварии на ЧАЭС, и затем отмечается снижение K_n , которое определяется естественным связыванием радионуклидов в почве (старение цезия) (рис. 5). Экстраполяция тренда, характерного для отдаленного периода (который можно принять как тренд естественного снижения K_n), к первым годам после выпадений совпадает с 3–4 годом после выпадений, т.е. соответствуют второй компоненте связывания цезия в почвенно-поглощающем комплексе почвы. В случае достаточно высокого плодородия почв эффект от применения агрохи-

мических защитных мероприятий ниже, и прекращение их применения не приводит к существенному увеличению поступления ^{137}Cs в растения (рис. 6).

Снижение K_n в это время определяется “старением” радионуклидов в почве. Примерно через 25 лет после выпадений K_n в продукцию растениеводства в районах с более высоким и низким агрофоном сближаются. При этом можно ожидать, что по прошествии этого времени динамика коэффициентов перехода в этих районах будет близка. Отметим, что эти закономерности носят достаточно общий характер и наблюдаются как для зерновых, так и для картофеля и овощей (рис. 5 и 6). Вследствие этого при оценке снижения K_n ^{137}Cs в продукцию необходимо учитывать как плодородие почв и особенности возделывания этих культур, так и историю применения мероприятий, направленных на снижение поступления ^{137}Cs в растения.

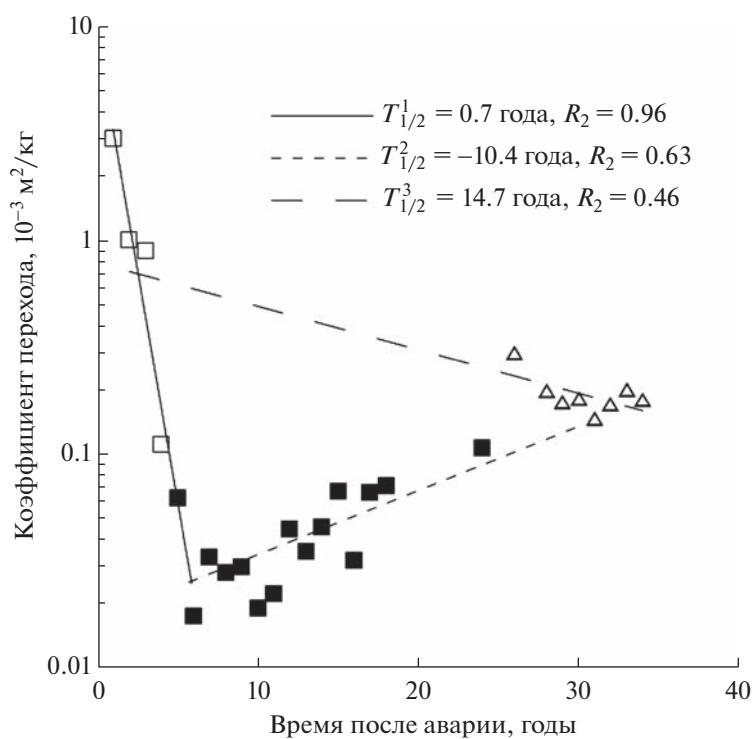


Рис. 5. Динамика изменения $K_{\text{п}}$ в ^{137}Cs в зерно в Гордеевском районе Брянской области.

Fig. 5. Dynamics of ^{137}Cs T_{ag} values to grain produced in the Gordeyevsky district of the Bryansk region.

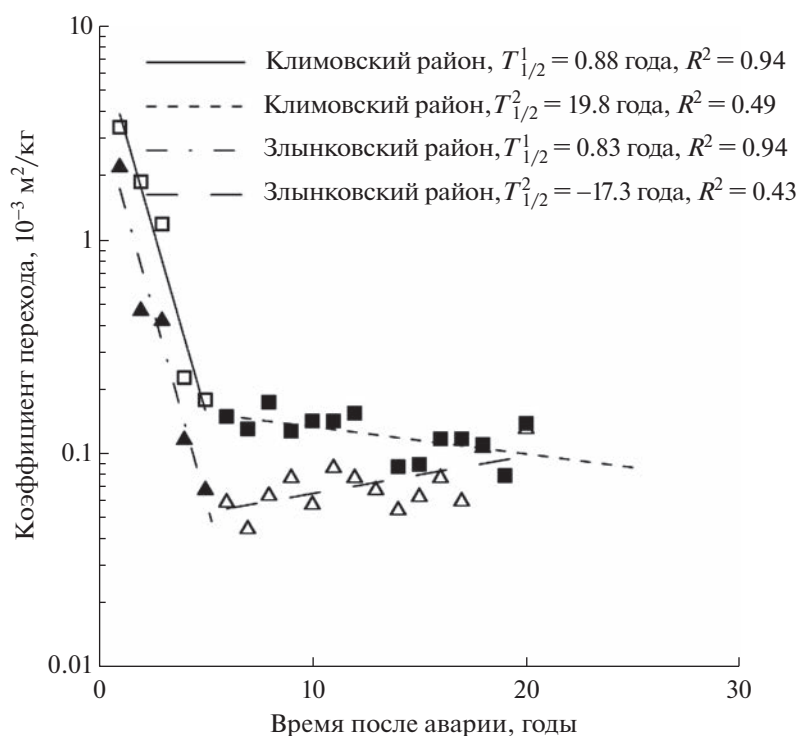


Рис. 6. Динамика изменения $K_{\text{п}}$ ^{137}Cs в картофель в Климовском и Злынковском районах Брянской области.

Fig. 6. Dynamics of ^{137}Cs T_{ag} values to potato produced in the Klimovsky and Zlunkovsky districts of the Bryansk region.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Снижение K_p в продукцию растениеводства в районах, пострадавших после аварии на Чернобыльской АЭС, носило сложный характер. Коэффициенты перехода в год выпадений, так же, как и динамика K_p в последующем, существенно зависели от исходного плодородия почв, подвергшихся загрязнению. Коэффициенты перехода ^{137}Cs в продукцию в районах с более высоким плодородием были в 3–8 раз (в зависимости от вида растений) ниже, чем в районах с низким агрофоном, а наиболее значительные различия отмечены для зерновых. Снижение K_p в районах с низким плодородием происходило более быстро, а достигнутый эффект по снижению K_p был выше, чем в районах с высоким плодородием. В некоторых районах после сильного снижения концентраций ^{137}Cs в продукции после 1991 г. отмечен медленный рост K_p ^{137}Cs в зерно, что объясняется недостаточной компенсацией снижения агрофона геохимическим связыванием ^{137}Cs в почве. В последующем динамика загрязнения продукции определялась разнонаправленными процессами, т.е. увеличением поступления ^{137}Cs в растения, которое компенсировалось естественным снижением биологической доступности радионуклидов в почвах под действием геохимических процессов, называемых в литературе “старением цезия”. В районах с интенсивным применением контрмер в сельском хозяйстве уменьшение K_p в сельскохозяйственную продукцию определялось в большей степени влиянием защитных мероприятий. В районах с ограниченным применением контрмер преобладающий вклад в снижение K_p вносили естественные биогеохимические процессы, определяющие связывание радионуклидов почвенно-поглощающим комплексом почвы. Вследствие этого адекватный прогноз поступления радионуклидов в растения невозможен без учета истории применения агрохимических мероприятий и исходного плодородия почв, подвергшихся загрязнению.

БЛАГОДАРНОСТИ

Авторы выражают признательность д-ру сельскохозяйственных наук Николаю Николаевичу Цыбулько за ценные замечания, позволившие улучшить представление материалов.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Alexakhin R.M., Fesenko S.V., Sanzharova N.I. Serious radiation accidents and the radiological impact on agriculture // Radiat. Prot. Dosim. 1996. V. 64. P. 37–42.
2. Fesenko S.V., Colgan P.A., Sanzharova N.I. et al. The dynamics of the transfer of caesium-137 to animal fodder in areas of Russia affected by the Chernobyl accident

and resulting doses from the consumption of milk and milk products // Radiat. Prot. Dosim. 1997. V. 69. № 4. P. 289–299.

3. Fesenko S.V., Alexakhin R.M., Sanzharova N.I., Spiridonov S.I. Dynamics of ^{137}Cs concentration in agricultural products in areas of Russia contaminated as a result of the accident at the Chernobyl nuclear power plant // Radiat. Prot. Dosim. 1995. V. 60. № 2. P. 155–166.
4. Fesenko S.V., Alexakhin R.M., Balonov M.I. et al. An extended critical review of twenty years of countermeasures used in agriculture after the Chernobyl accident // Sci. Total Environ. 2007. V. 383. P. 1–24.
5. Радиоэкологические последствия аварии на Чернобыльской АЭС: биологические эффекты, миграция, реабилитация загрязненных территорий: Монография / Под ред. Н.И. Санжаровой и С.В. Фесенко. М.: РАН, 2018, 278 с. [Radioekologicheskie posledstviya avarii na Chernobyl'skoj AES: biologicheskie efekty, migraciya, reabilitaciya zagryaznennykh territorij: Monografiya / Pod red. chl.-korr. RAN N.I. Sanzharovoj i prof. S.V. Fesenko. M.: RAN, 2018. 278 p. (In Russ.)]
6. International Atomic Energy Agency. Environmental Consequences of the Chernobyl Accident and Their Remediation: Twenty Years of Experience. Report of the UN Chernobyl Forum Expert Group “Environment” (EGE). Vienna: International Atomic Energy Agency, 2009.
7. Фесенко С.В., Санжарова Н.И., Лисянский К.Б., Алексахин Р.М. Динамика снижения коэффициентов перехода ^{137}Cs в сельскохозяйственные растения после аварии на Чернобыльской АЭС // Радиационная биология. Радиоэкология. 1998. Т. 38. № 2. С. 256–273. [Fesenko S.V., Sanzharova N.I., Lisyanskiy K.B., Alexakhin R.M. Dynamics of reduction of ^{137}Cs transfer factors to agricultural plants after the Chernobyl accident // Radiation Biology. Radioecology. 1998. V. 38. № 2. P. 256–273. (In Russ.)]
8. Fesenko S.V., Jacob P., Alexakhin R. et al. Important factors governing exposure of the population and countermeasure application in rural settlements of the Russian Federation in the long term after the Chernobyl accident // J. Environ. Radioact. 2001. V. 56. P. 77–98.
9. Alexakhin R.M., Sanzharova N.I., Fesenko S.V. et al. Chernobyl radionuclide distribution, migration, and environmental and agricultural impacts // Health Phys. 2007. V. 93. № 5. P. 418–426.
10. Панов А.В., Фесенко С.В., Санжарова Н.И. и др. Влияние сельскохозяйственных контрмер на облучение населения территорий, пострадавших от аварии на Чернобыльской АЭС // Радиация и риск. 2006. Т. 46. № 2. С. 273–279. [Panov A.V., Fesenko S.V., Sanzharova N.I. et al. Impact of Agricultural Countermeasures on the Exposure of the Population of the Areas Affected by the Chernobyl Accident // Radiation and Risk. 2006. V. 46. № 2. P. 273–279 (In Russ.)]
11. Фесенко С.В., Прудников П.В., Емлютина Е.С. и др. Динамика содержания ^{137}Cs в сельскохозяйственной продукции после аварии на ЧАЭС: зерно, картофель и овощи // Радиационная гигиена. 2022. Т. 15. № 4.

- С. 81–93. [Fesenko S.V., Prudnikov P.V., Emlyutina E.S. et al. Dynamics of ^{137}Cs concentrations in agricultural products after the Chernobyl accident: cereals, potato, and vegetables // *Radiation Hygiene*. 2022. V. 15. № 4. P. 81–93. (In Russ.)]
12. Фесенко С.В., Прудников П.В., Исамов Н.Н. и др. Динамика снижения содержания ^{137}Cs в кормовых культурах в отдаленный период после аварии на Чернобыльской АЭС // *Радиационная биология. Радиоэкология*. 2022. Т. 62. № 2. С. 185–195. [Fesenko S.V., Prudnikov P.V., Isamov N.N. et al. Dynamics of ^{137}Cs Concentration in Fodders in the Long-Term after the Chernobyl Accident // *Radiation Biology. Radioecology*. 2022. V. 62. № 2. P. 185–195. (In Russ.)]
 13. Pröhl G., Ehlen S., Fiedler I., Kirchner G. et al. Ecological half-lives of ^{90}Sr and ^{137}Cs in terrestrial and aquatic ecosystems. 2006 // *J. Environ. Radioact.* 2006. V. 91. № 1–2. P. 41–72.
 14. Mück K. Long-term effective decrease of cesium concentration in foodstuffs after nuclear fallout // *Health Phys.* 1997. V. 72. № 5. P. 659–673.
 15. Маркина З.Н., Курганов А.А., Воробьев Г.Т. Радиоактивное загрязнение продукции растениеводства Брянской области. Брянск: Брянский Центр “Агрохимрадиология”, 1997. 241 с. [Markina Z.N., Kurganov A.A., Vorob'ev G.T. Radioaktivnoe zagriznenie produktsii rastenievodstva Brjanskoj oblasti. Brjansk: Brjanskij Centr “Agrohimradiologija”, 1997 241 p. (In Russ.)]
 16. Прудников П.В. Использование агрономических руд и новых комплексных минеральных удобрений на радиоактивно загрязненных почвах. Брянск: ФГБУ Центр химизации и сельскохозяйственной радиологии “Брянский”, 2012. 212 с. [Prudnikov P.V. Ispol'zovanie agronomicheskikh rud i novyx kompleksnykh mineral'nykh udobrenij na radioaktivno zagriznennykh pochvakh. Brjansk: FGBU Centr himizatsii i sel'skhozjajstvennoy radiologii “Brjanskiy”; 2012. 212 p. (In Russ.)]
 17. Гераськин С.А., Фесенко С.В., Черняева Л.Г., Санжарова Н.И. Статистические методы анализа эмпирических распределений коэффициентов накопления радионуклидов растениями // *Сельскохозяйственная биология*. 1991. № 1. С. 130–137. [Geras'kin S.A., Fesenko S.V., Chernyaeva L.G., Sanzharova N.I. Statisticheskie metody analiza jempiricheskikh raspredelenij kojefficientov nakoplenija radionuklidov rastenijami // *Sel'skhozjajstvennaja biologija*. 1991. № 1. P. 130–137. (In Russ.)]
 18. Временные рекомендации по ведению агропромышленного производства в Белорусской ССР на территории, подвергшейся радиоактивному загрязнению. Государственный агропромышленный комитет СССР. М.: Всесоюзный научно-исследовательский институт сельскохозяйственной радиологии (ВНИИСХР), 1986. 241 с. [Vremennye rekomendacii po vedeniju agropromyshlennogo proizvodstva v Belorusskoj SSR na territorii, podvergshejsja radioaktivnomu zagriznzeniju. Moskva: VNIISHR, 1986. 41 p. (In Russ.)]
 19. Рекомендации по ведению сельского хозяйства в условиях радиоактивного загрязнения территории в результате аварии на Чернобыльской АЭС на период 1991–1995 гг. М.: Государственная комиссия Совета министров СССР по продовольствию и закупкам Всесоюзный научно-исследовательский институт сельскохозяйственной радиологии (ВНИИСХР). Обнинск, 1991. 39 с. [Rekomendacii po vedeniju sel'skogo hozjajstva v uslovijah radioaktivnogo zagriznenija territorii v rezul'tate avarii na Chernobyl'skoj AJeS na period 1991–1995. Moskva–Obninsk: VNIISHR, 1991. 39 p. (In Russ.)]
 20. Руководство по ведению сельскохозяйственного производства на радиоактивно загрязненных территориях Республики Беларусь и Российской Федерации. Минск–Москва: МинЧС Российской Федерации, Минсельхоз Российской Федерации, Минсельхоз Республики Беларусь, 2005. 40 с. [Rukovodstvo po vedeniju sel'skhozjajstvennogo proizvodstva na radioaktivno zagriznjonnykh territorijah Respubliki Belarus' i Rossijskoj Federacii. Minsk–Moskva: MinChS Rossijskoj Federacii, Minsel'hoz Rossijskoj Federacii, Minsel'hoz Respubliki Belarus', 2005. 40 p. (In Russ.)]
 21. Воробьев Г.Т. Почвы Брянской области. Брянск: Грани, 1993. 160 с. [Vorob'ev G.T. Pochvy Brjanskoj oblasti. Brjansk: Grani; 1993. 160 p. (In Russ.)]
 22. Tagami K., Tsukada H., Uchida S., Howard B.J. Changes in the soil to brown rice concentration ratio of radiocaesium before and after the Fukushima Daiichi nuclear power plant accident in 2011 // *Environ. Sci. Technol.* 2018. V. 52. P. 8339.
 23. Tagami K., Uchida S. Effective half-lives of ^{137}Cs in giant butterbur and field horsetail, and the distribution differences of potassium and ^{137}Cs in aboveground tissue parts // *J. Environ. Radioact.* 2015. V. 141. P. 138–145.

Dynamics of ^{137}Cs Transfer Factors to Agricultural Products after the Chernobyl Accident: Grain, Potatoes, and Vegetables

S. V. Fesenko^{a, #}, P. V. Prudnikov^b, E. S. Emlyutina^a, I. E. Epifanova^a, I. E. Titov^a, and O. A. Shubina^a

^a Russian Institute of Radiology and Agroecology, Obninsk, Russia

^b Bryansk Center of Chemicalization and Agricultural Radiology, Bryansk Michurinskiy village, Bryansk region, Russia

[#]E-mail: Corwin_17F@mail.ru

The results of the analysis of the ^{137}Cs aggregated transfer factors (T_{ag}) to crops (cereals, potatoes, and vegetables) produced in the districts of the Bryansk region affected after the Chernobyl accident are presented. The aggregated transfer factors in the year of the deposition as well as the dynamics of T_{ag} in the subsequent

years depended considerably on the fertility of soils subjected to contamination. The transfer factors of ^{137}Cs to crops in the areas with higher fertility were 3–8 times lower (depending on the plant species) than in the areas with low fertility, and the most significant differences were observed for cereals. Decrease in T_{ag} values was of irregular nature. The half-lives of ^{137}Cs aggregated transfer factors for the period from 1986 to 2021 were calculated. It is shown that the first half-life values calculated for the period of intensive application of countermeasures (1987–1991) were from 0.7 to 1.4 years. The second half-lives varied from 7.3 to 17.3 years. In some areas, after a strong reduction in ^{137}Cs concentrations in crops after 1994, there was a slow increase in ^{137}Cs aggregated transfer factors, which can be explained by insufficient compensation for this decrease of geochemical binding of ^{137}Cs in the soil. Later the dynamics of crop contamination was determined by multidirectional processes: i.e., increase in ^{137}Cs transfer to plants and natural decrease of radionuclides bioavailability in soils under the influence of geochemical processes. In areas with intensive application of countermeasures, the reduction of T_{ag} to crops was determined to a greater extent by the influence of agrochemical countermeasures. In the areas with limited application of countermeasures, the natural biogeochemical processes determining radionuclide binding by the soil-absorbing complex made the predominant contribution to the T_{ag} reduction. Limitations of the approach based on the estimation of half-lives and the necessity of using the history of countermeasures implemented, as well as the soil fertility for prediction of the ^{137}Cs intake by plants is noted.

Keywords: Chernobyl NPP, transfer factor, agricultural products, south-western districts of Bryansk region, monitoring in agriculture, ^{137}Cs