

Динамика содержания ^{137}Cs в кормах сельскохозяйственных животных в районах Брянской области, пострадавших после аварии на ЧАЭС

С.В. Фесенко¹, П.В. Прудников², Н.Н. Исамов¹, Е.С. Емлютина¹,
И.Э. Епифанова¹, О.А. Шубина¹

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

² Брянский центр «Агрехимрадиология», п. Мичуринский, Брянская область, Россия

Публикация продолжает цикл работ, посвященных изучению закономерностей изменения содержания ^{137}Cs в продукции сельскохозяйственного производства после аварии на Чернобыльской АЭС. Целью исследований являлся анализ информации, описывающей изменение содержания ^{137}Cs в кормах сельскохозяйственных животных в юго-западных районах Брянской области. Приведены данные по проведению защитных мероприятий в кормопроизводстве, описана система радиологического мониторинга загрязнения кормов. Показано, что динамика изменения содержания ^{137}Cs в кормах во многом определялась регулярностью и особенностями проведения агротехнических реабилитационных мероприятий. Эффективные периоды полуснижения содержания ^{137}Cs в кормах в первый период после аварии (1987–1990 гг.) варьировали в пределах от 0,57 до 2,7 лет. В последующем (1991–2021 гг.) снижение загрязнения кормов замедлилось, а периоды полуснижения варьировали от 8,0 до 50 лет и более в зависимости от объемов реабилитационных работ и особенностей растений, используемых для производства кормов.

Ключевые слова: Чернобыльская АЭС, корма сельскохозяйственных животных, юго-западные районы Брянской области, мониторинг в сельском хозяйстве, ^{137}Cs .

Введение

Загрязнение сельскохозяйственных угодий после аварии на Чернобыльской АЭС привело к повышенному облучению населения, проживающего на территориях, подвергшихся воздействию [1–7]. При этом значительный вклад в формирование дозовых нагрузок на население вносят продукты животного происхождения и, в первую очередь, молоко [1, 4–6].

Для смягчения последствий Чернобыльской аварии в районах, подвергшихся радиоактивному загрязнению, в первую очередь в юго-западных районах Брянской области, потребовалось крупномасштабное проведение защитных и реабилитационных мероприятий [1, 7–10]. В их основе лежали данные радиологического мониторинга, организованного службами Минсельхоза (Центром агрохимрадиологии «Брянский» и Брянской межобластной ветеринарной лабораторией) [10–13]. Поскольку содержание радионуклидов в продуктах животноводства определяется поступлением радионуклидов в организм животных с кормами, то мониторинг содержания ^{137}Cs в кормах имел важное значение при формировании приоритетов этих мероприятий [1, 6–9]. Проведение мониторинга в течение 35 лет после Чернобыльской аварии обеспечило выявление сельскохозяйственной продукции, не соответствующей допустимым

уровням [1, 14]. Это позволило организовать ее переработку и избежать неоправданных потерь этой продукции. Использование этих данных также имеет важное значение для обоснования перехода к условиям нормальной жизнедеятельности в пострадавших регионах [1, 2]. Анализ динамики содержания ^{137}Cs в сельскохозяйственной продукции с 1986 по 1994 г., а также с 2010 по 2020 г. представлен в ряде публикаций [15–18], однако данные за весь промежуток времени, прошедший после аварии, обобщались недостаточно. Это ограничивает использование результатов мониторинга, проводимого организациями Минсельхоза России, для решения задач, связанных с обоснованием перехода населения, проживающего на загрязненных территориях, к условиям нормальной жизнедеятельности и оценки последствий других потенциально возможных аварий [1, 2].

В первой публикации цикла [19] представлены данные по содержанию ^{137}Cs в продукции растениеводства, в то время как настоящая статья описывает динамику содержания ^{137}Cs в кормах животных. Ожидается, что данные по концентрациям ^{137}Cs в продукции животноводства будут представлены в последующих публикациях.

Для облегчения сравнения закономерностей изменения содержания ^{137}Cs в различных видах сельскохозяйственной продукции все статьи, посвященные этой теме,

Фесенко Сергей Викторович

Всероссийский научно-исследовательский институт радиологии и агроэкологии

Адрес для переписки: 249032 Калужская область, г. Обнинск, Киевское шоссе, 109 км, Россия; E-mail: Corwin_17F@mail.ru

имеют близкую структуру и аналогичное представление полученных результатов.

Цель исследования – анализ данных радиоэкологического мониторинга содержания ^{137}Cs в кормах, получаемых в юго-западных районах Брянской области, подвергшихся загрязнению после аварии на Чернобыльской АЭС.

Задачи исследования

1. Обобщение данных по концентрациям ^{137}Cs в кормах сельскохозяйственных животных, полученных организациями Минсельхоза России.

2. Оценка периодов полуснижения содержания ^{137}Cs в вышеперечисленной продукции в различные временные интервалы после аварии.

3. Оценка роли факторов, определяющих динамику снижения содержания ^{137}Cs в кормах сельскохозяйственных животных на протяжении 35 лет после аварии на Чернобыльской АЭС.

Исходные данные

Для анализа закономерностей изменения содержания ^{137}Cs в кормах сельскохозяйственных животных использовались данные радиоэкологического мониторинга, организованного Центром агрохимрадиологии «Брянский» и областной ветеринарной радиологической лабораторией в 7 юго-западных районах Брянской области: Гордеевском, Злынковском, Климовском, Клинцовском, Красногорском, Новозыбковском и Стародубском [1, 10–11, 18–20]. К основным видам кормов, входящих в рацион питания животных, относят грубые корма (сено, солома, мякина), сочные корма (силос, сенаж), зелёные корма (травы естественные, сеяные и др.). В состав рационов животных также входят концентраты, корнеплоды, мел, поваренная соль с микроэлементами, витамины А и D₂,

а также барда и жом свекольный, но вклад этих компонентов в поступление ^{137}Cs в рацион является достаточно низким [1, 14]. В рамках мониторинга проводился отбор проб всех основных видов кормов. Динамика объемов проведения мониторинга кормов показана на рисунке 1, а основные характеристики пострадавших районов и данные, использованные при проведении настоящих исследований, приведены в таблице 1.

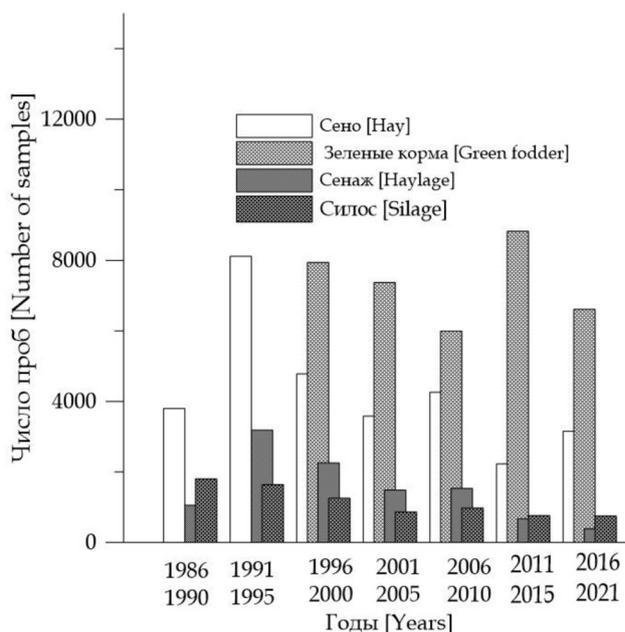


Рис. 1. Объемы отбора проб кормов для сельскохозяйственных животных в юго-западных районах Брянской области в 1986–2021 гг.

[Fig. 1. Quantity of feedstuffs samples taken annually in southwestern districts of Bryansk region in 1986–2021]

Характеристики загрязненных районов и количество данных, использованных для анализа

Таблица 1

Characteristics of contaminated areas and quantity of data used for evaluations

[Table 1

Районы [Districts]	Плотность загрязнения ¹ , кБк/м ² [Contamination density ¹ , kBq/m ²]			Площадь, км ² [Area, km ²]	Сено [hay]	Сенаж [haylage]	Силос [silage]	Зеленый корм [Green forage]	Всего [Total]
	Сенокосы [Haylands]	Пастбища [Pastures]	Пашня [arable lands]						
Гордеевский [Gordeyevsky]	546 (409) ²	601 (421)	366 (210)	327	5459	3434	723	3980	13596
Злынковский [Zlunkovsky]	745 (544)	589 (486)	361 (333)	253	2166	406	812	2387	5771
Климовский [Klimovsky]	259 (188)	273 (188)	156 (93)	779	4296	1567	1542	1720	9125
Клинцовский [Klintsovsky]	393 (431)	442 (455)	232 (179)	444	4039	1145	1136	2640	8960
Красногорский [Krasnogorsky]	590 (586)	525 (655)	320 (313)	424	3070	1416	778	2339	7603
Новозыбковский [Novozybkovsky]	1011 (646)	884 (596)	526 (318)	391	6845	2375	2426	21583	33229
Стародубский [Starodubsky]	85	73	47	918	4822	316	820	3590	9548
Всего [Total]	–	–	–	3536	30697	10695	8237	38239	87832

¹Плотность выпадений дана на май 1986 г. [¹Fallout density is given for May 1986]

²В скобках дано среднее квадратичное отклонение [²The standard deviations are given in the brackets]

Наиболее высокие плотности загрязнения ^{137}Cs сенокосов и пастбищ (свыше 1000 кБк/м²) отмечены в Новозыбковском, Красногорском и Злынковском районах. Достаточно высокими были плотности загрязнения кормовых угодий (около 500 кБк/м²) в Клинцовском и Гордеевском районах Брянской области. Существенно меньшие уровни загрязнения сенокосов и пастбищ характерны для Климовского района, а наименьшие уровни загрязнения почв кормовых угодий (менее 100 кБк/м²) отмечены для Стародубского района. Объем мониторинга в этих районах в целом соответствовал как плотности загрязнения сельскохозяйственных угодий, так и объемам производимой продукции. Для анализа динамики загрязнения кормов использовалось более 30 тысяч значений концентрации ^{137}Cs в сене, более 10 тысяч в сенаже, более 8 тысяч в силосе и более 38 тысяч в зеленых кормах. Данные, представленные в таблице 1, отражают результаты систематического отбора проб, проведенного в 177 хозяйствах с плотностью загрязнения кормовых угодий от 17 до 3800 кБк/м². Из этих хозяйств в 55 плотность загрязнения сенокосов на 1986 г. была меньше 185 кБк/м², в 46 плотность загрязнения сенокосов превышала 555 кБк/м², а в 76 хозяйствах плотность загрязнения была в диапазоне между 185 и 555 кБк/м².

Мониторинг также проводился на отчужденных сельскохозяйственных угодьях, включая хозяйства «им. 24 Партсъезда» и «им. Кирова» Красногорского района со средней плотностью загрязнения сенокосов на 1986 г. более 3000 кБк/м², «им. 22 Партсъезда», «Красная Ипуть», «Родина» и «Комсомолец» Новозыбковского рай-

она с плотностью выпадений на 1986 г. – 2560, 1740, 1710 и 1590 кБк/м² соответственно.

Из данных, представленных на рисунке 1, видно, что динамика объемов мониторинга различных видов кормов существенно отличалась. Мониторинг содержания ^{137}Cs в сене проводился в максимальных масштабах в 1991–1995 гг. Начиная с 1996 г., объемы проведения мониторинга сена примерно в 2 раза снизились, оставаясь на этом уровне до настоящего времени. В этот период резко увеличились объемы контроля зеленой массы естественных и многолетних трав, которые служат исходным сырьем для производства сена и сенажа, что позволило компенсировать уменьшение интенсивности мониторинга сена.

Существенно отличались и объемы проведения мониторинга в различных районах Брянской области. В максимальных объемах мониторинг проводился в хозяйствах Новозыбковского района, высокой была интенсивность мониторинга в хозяйствах Гордеевского, Злынковского, Клинцовского и Красногорского районов, тогда как в хозяйствах и населенных пунктах Климовского и Стародубского районов отбор проб выполнялся в более ограниченных масштабах. В настоящее время проведение мониторинга в Климовском и Стародубском районах практически прекращено.

Для контроля загрязнения продукции животноводства, начиная с 1993 г., были введены контрольные уровни (Ку) на содержание ^{137}Cs в кормах (табл. 2) [14]. Значения этих уровней устанавливались таким образом, чтобы гарантировать отсутствие превышения временно допусти-

Таблица 2

Временные допустимые уровни содержания ^{137}Cs (ВДУ), гигиенические требования к безопасности и пищевой ценности пищевых продуктов (СанПиН) и контрольные уровни содержания этого радионуклида в кормах [14, 20]

[Table 2]

Temporary permissible levels of ^{137}Cs (TPL), hygienic requirements for food safety and nutritional value (SanPiN) and control levels (Cl) of this radionuclide in feedstuffs [14, 20]

Документ [Document]	ВДУ-91 [TPL 91]	ВДУ-93 [TPL 93]	СанПиН 2.3.2.560-96 [SanPiN 2.3.2.560-96]	СанПиН 2.3.2.1078-01 [SanPiN 2.3.2.1078-01]	СанПиН 2.3.2.2650–10 [SanPiN 2.3.2.2650–10]
Допустимые уровни содержания ^{137}Cs в пищевых продуктах [Permissible levels of ^{137}Cs in food]					
Молоко [Milk]	370	370	50,0	100,0	100
Мясо (говядина) [Beef]	740	600	160,0	160,0	200,0
Годы действия [Years in effects]	1991–1993	1993–1996	1996–2001	2001–2010	2010 – настоящее время
Контрольные уровни содержания ^{137}Cs в кормах [Control levels of ^{137}Cs in feed]					
Документ [Document]	Ку-94 (Cl-94)		ВП 13.5.13/06-01 [VR 13.5.13/06-01]		
Сено [Hay]	600		400,0		
Солома [Straw]	600		400,0		
Силос [Silage]	600		80,0		
Сенаж [Haylage]	600		80,0		
Зелёные корма [Green feeds]	370		100,0		
Корнеплоды [Beetroots]	600		60,0		
Концентрированные корма [Concentrates]	600		200,0		

мых уровней (ВДУ-91¹ и ВДУ-93²) содержания радионуклидов в пищевых продуктах и мотивировать снижение этих нормативов до возможно низкого уровня [20]. В последующем были введены постоянные гигиенические требования к качеству и безопасности продовольственного сырья и пищевых продуктов³, СанПиН 2.3.2.560-96. (с доп. и изм. №18 – СанПиН 2.3.2.2650-10)⁴. В случае превышения контрольных уровней допускалось использование этих кормов для кормления рабочего скота и на ранней стадии откорма животных на мясо.

Для обеспечения гигиенических требований к безопасности пищевых продуктов в 2001 г. контрольные уровни содержания ¹³⁷Cs в кормах были изменены, и введены в действие новые нормативы на допустимые концентрации ⁹⁰Sr и ¹³⁷Cs в кормах [14]. К сожалению, в том же году Ветеринарные правила ВП 13.5.13/06-01 были отменены, и в настоящее время единственным документом, устанавливающим контрольные уровни допустимого содержания ¹³⁷Cs в кормах, остаются уровни, введенные в 1994 г. [14]. Таким образом, в настоящее время отсутствует система нормативов, определяющая допустимые концентрации радионуклидов в кормах животных. Это существенно влияет на обоснование решений, направленных на проведение реабилитации сельскохозяйственных угодий на основе данных мониторинга радиоактивного загрязнения кормов, а «допустимые» уровни содержания ¹³⁷Cs не гарантируют получение молока и мяса с содержанием радионуклидов, удовлетворяющим требованиям СанПиН 2.3.2.1078-01 (с доп. и изм. № 18 – СанПиН 2.3.2.2650-10).

Отсутствие современных нормативов, определяющих допустимые концентрации радионуклидов в кормах животных, является пробелом в российском регулировании, касающемся радиационной безопасности, и осложняет переход к нормальной жизнедеятельности в регионах, пострадавших после аварии на Чернобыльской АЭС.

При анализе закономерностей динамики содержания радионуклидов в сельскохозяйственной продукции учитывалось влияние защитных и реабилитационных мероприятий [1]. На протяжении всего периода времени, прошедшего после Чернобыльской аварии, к основным мероприятиям в области кормопроизводства относились коренное и поверхностное улучшение лугов и пастбищ, которые особенно широко применялись в первые годы после Чернобыльской аварии (рис. 2). Обе эти технологии относятся к категории культуртехнических мер и проводятся на постоянной основе с целью поддержания продуктивности кормовых угодий [1, 11].

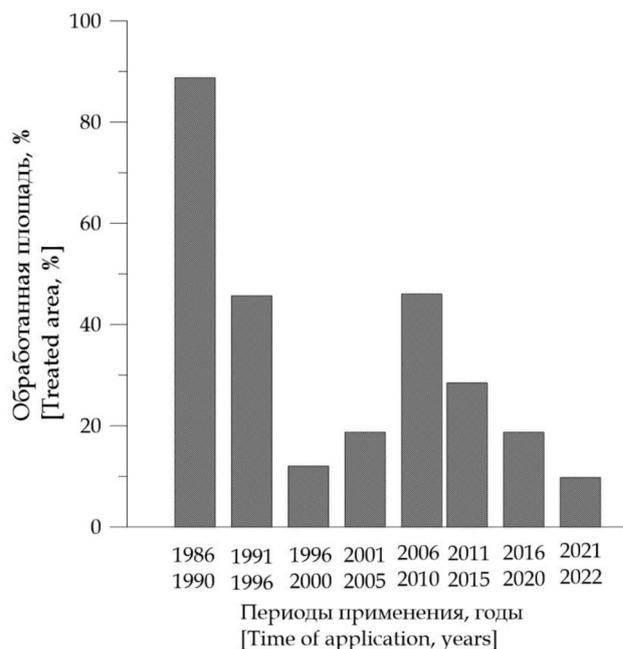


Рис. 2. Масштабы проведения коренного улучшения лугов и пастбищ после аварии на Чернобыльской АЭС [3, 8]. Процент обработанных площадей от общей площади угодий
[Fig. 2. Implementation of radical improvement at the meadows and pastures used for feedstuffs production [3, 8]. Percentage of cultivated areas of the total area of lands]

Культуртехнические мероприятия являются нормальной сельскохозяйственной практикой, которая для использования в загрязненных районах была дополнена элементами, обеспечивающими максимальное снижение поступления радионуклидов из почвы в растения [1, 5]. Снижение объемов проведения или прекращения этих мероприятий может привести к увеличению поступления в растительность и уменьшению продуктивности сенокосов и пастбищ [1].

Поверхностное улучшение включает поверхностную агротехническую обработку почвы и дернины посредством фрезерования или дискования, а при проведении коренного улучшения дополнительно используется вспашка почвы на глубину 20–25 см. В дальнейшем работы ведутся по принятым технологиям для данной почвенно-климатической зоны и включают в себя внесение удобрений, применение мелиорантов, подбор травосмесей. Эти мероприятия сохраняют эффективность в течение

¹ Временные допустимые уровни содержания цезия-137 и стронция-90 в пищевых продуктах и питьевой воде, устанавливаемые в связи с аварией на Чернобыльской АЭС (ВДУ-91). М.: Минздрав СССР, 1991. [VDU 91. Temporary Permissible Levels of Cesium-137 and Strontium-90 in Food and Drinking Water Established in Connection with the Chernobyl Accident (TPL-91). Moscow: Ministry of Health of the USSR, 1991. (In Russ.).]

² ВДУ-93. Временные допустимые уровни содержания радионуклидов цезия-134, -137 и стронция-90 в пищевых продуктах. М.: Минздрав РФ, 1993. [VDU 93. Temporary Permissible Levels of Cesium-134, -137 and Strontium-90 Radionuclides Content in Food Products. Moscow: Ministry of Health of the RF, 1993. (In Russ.).]

³ Гигиенические требования к качеству и безопасности продовольственного сырья и пищевых продуктов. Санитарные правила и нормы. СанПиН 2.3.2.560-96. М., 1997. [Hygienic Requirements to Quality and Safety of Food Raw Materials and Food Products. Sanitary Rules and Norms. SanPiN 2.3.2.560-96. M. 1997 (In Russ.).]

⁴ Дополнения и изменения № 18 к санитарно-эпидемиологическим правилам и нормативам СанПиН 2.3.2.1078-01. [Supplements and Amendments # 18 to SanPiN 2.3.2.1078-01 Sanitary and Epidemiological Rules and Standards (In Russ.).]

ние 4–6 лет после начала использования обработанного поля. Таким образом, их применение является одним из основных механизмов реабилитации загрязненных территорий [1, 5].

Максимальная эффективность этих мероприятий наблюдается при первом применении, достигая 10 и более раз⁵ и особенно высоких значений на влажных лугах. При повторном использовании их эффективность ниже и обычно не превышает 3 раз в зависимости от использованной технологии и характеристик луга [1, 7]. В то же время их проведение ограничивает использование лугов и пастбищ, на которых оно проведено в течение 1–1,5 лет после внедрения, так как выпас животных или использование сельскохозяйственной техники для сенокоса могут повредить растения, корневая система которых в первый период после проведения работ еще не укоренилась и чувствительна к воздействиям такого рода.

После Чернобыльской аварии коренное и поверхностное улучшение проводилось на максимальной площади, где это было возможно, с учетом потребностей в организации кормовой базы. В этом заключается существенное отличие реабилитации кормовых угодий от мероприятий на пахотных землях, где внесение калийных и фосфорных удобрений было возможно на всей территории, подвергшейся загрязнению, а использование полей было возможно в год их применения.

Максимальные уровни применения мероприятий отмечались в первые 5–7 лет после аварии, и к 1991 г. практически все доступные кормовые угодья в юго-западных районах Брянской области были охвачены этими мероприятиями [5–8]. В 1996–2000 гг. проведение этих мероприятий было минимальным и не соответствовало потребности в окультуривании сельскохозяйственных угодий. Впоследствии в рамках федеральной национальной программы (ФЦП) «Сохранение и восстановление плодородия почв земель сельскохозяйственного назначения и агроландшафтов как национального достояния России на 2006–2013 годы» в 2006–2013 гг. работы по реабилитации загрязненных территорий

проводились в достаточно больших объемах, что повлияло в этот период на динамику загрязнения как продукции растениеводства, так и продукции кормопроизводства [1, 19].

Планирование мероприятий основывалось на оценке уровня достигнутого радиационного благополучия в сфере агропромышленного комплекса и значительно отличалось от района к району (табл. 3). Важным фактором, определяющим объемы проведения мероприятий в отдаленный период после Чернобыльской аварии, являлось и то, что в регионе, в частности, в Климовском и Стародубском районах, появились крупные агрохолдинги, которые финансировали улучшение сенокосов и пастбищ, используемых для производства кормов для сельскохозяйственных животных.

Так же, как и в первой статье настоящего цикла [19], для статистического анализа данных применялся подход, приведенный в публикации [21].

Концентрации ^{137}Cs в кормах в первый год после выпадений

Данные по концентрациям ^{137}Cs в рассматриваемых видах кормов в 1986 г. приведены в таблице 4.

Количество измерений составило 1193 пробы сена, 68 проб сенажа и 352 пробы силоса. Вариабельность концентраций в отдельных пробах составила от $2,0 \times 10^2$ до $2,5 \times 10^5$ Бк кг⁻¹ для сена, от 74 до $4,7 \times 10^4$ Бк кг⁻¹ для сенажа и от 3,7 до $2,4 \times 10^3$ Бк кг⁻¹ для силоса. Наибольшие уровни содержания ^{137}Cs в сене (более 20,000 Бк кг⁻¹) отмечены в Новозыбковском, Злынковском и Красногорском районах, примерно в 2 раза меньшие уровни содержания ^{137}Cs в сене отмечены в Клиновском и Гордеевском районах, а минимальные – в Климовском районе. При этом следует отметить наличие зависимости загрязнения сена от плотности выпадений. Средние концентрации ^{137}Cs в сене ($Q(\sigma)$, Бк/кг) достаточно хорошо описываются простым уравнением:

$$Q(\sigma) = 26,3 \times \sigma, R^2 = 0,71$$

где σ – плотность выпадений в 1986 г., кБк/м².

Таблица 3

Объемы проведения реабилитационных мероприятий в юго-западных районах Брянской области в отдаленный период после Чернобыльской аварии в процентах от площади сенокосов и пастбищ

[Table 3]

Implementation of remedial options in the southwestern districts of the Bryansk region in the long-term after the Chernobyl accident as a percentage of the area of hayfields and pastures

Районы	Годы [Years]						Всего за 2016–2021 гг. [Total, 2016–2021]
	2016	2017	2018	2019	2020	2021	
Гордеевский [Gordeyevsky]	2	2	2	1			7
Злынковский [Zlunkovsky]	6	10	10	13	14	1	54
Климовский [Klimovsky]	4	0	0	5	11	26	47
Клиновский [Klintsovsky]	8	6	4	2	1		20
Красногорский [Krasnogorsky]	1	2	4	4	5	9	26
Новозыбковский [Novozybkovsky]	1	2	1	1		2	8
Стародубский [Starodubsky]	1	4	4	4	6	3	22
Гордеевский [Gordeyevsky]	3	3	3	3	4	6	23

⁵ По критерию снижения коэффициентов перехода ^{137}Cs в растения.

Таблица 4
**Параметры распределения концентраций ^{137}Cs в пробах кормов, отобранных в юго-западных районах
 Брянской области в 1986 г., Бк/кг**

[Table 4]

**Parameters of distribution of ^{137}Cs concentrations in samples of feedstuffs taken in southwestern districts
 of Bryansk region in 1986, Bq/kg**

Районы [Districts]	N ¹	Среднее [Mean]	Стандартное отклонение [St. Dev]	Геометрическое среднее [G. Mean]	Медиана [Median]	Мин. [Min]	Max. [Max]
Сено [Hay]							
Гордеевский [Gordeyevsky]	12	$1,1 \times 10^4$	$1,2 \times 10^4$	$7,6 \times 10^3$	$7,4 \times 10^3$	$3,5 \times 10^3$	$4,7 \times 10^4$
Злынковский [Zlunkovsky]	7	$2,0 \times 10^4$	$1,1 \times 10^4$	$1,6 \times 10^4$	$2,1 \times 10^4$	$1,9 \times 10^3$	$4,1 \times 10^4$
Климовский [Klimovsky]	14	$7,9 \times 10^3$	$5,0 \times 10^3$	$4,4 \times 10^3$	$6,1 \times 10^3$	$2,6 \times 10^3$	$2,2 \times 10^4$
Клинцовский [Klintsovsky]	17	$1,1 \times 10^4$	$8,5 \times 10^3$	$8,6 \times 10^3$	$6,7 \times 10^3$	$2,7 \times 10^3$	$3,5 \times 10^4$
Красногорский [Krasnogorsky]	16	$2,2 \times 10^4$	$6,0 \times 10^3$	$2,2 \times 10^4$	$2,2 \times 10^4$	$1,5 \times 10^4$	$3,3 \times 10^4$
Новозыбковский [Novozybkovsky]	12	$2,3 \times 10^4$	$6,6 \times 10^3$	$2,3 \times 10^4$	$2,2 \times 10^4$	$1,7 \times 10^4$	$4,2 \times 10^4$
По 6 районам [For 6 districts]	78	$1,6 \times 10^4$	$1,0 \times 10^4$	$1,2 \times 10^4$	$1,6 \times 10^4$	$2,6 \times 10^3$	$4,7 \times 10^4$
Сенаж [Haylage]							
Злынковский [Zlunkovsky]	8	$1,4 \times 10^4$	$9,8 \times 10^3$	$1,0 \times 10^4$	$1,1 \times 10^4$	$1,9 \times 10^3$	$3,4 \times 10^4$
Климовский [Klimovsky]	10	5476	$8,3 \times 10^3$	$3,9 \times 10^3$	$3,7 \times 10^3$	$9,0 \times 10^2$	$2,8 \times 10^4$
Новозыбковский [Novozybkovsky]	13	$7,6 \times 10^3$	$8,0 \times 10^3$	$2,9 \times 10^3$	$2,7 \times 10^3$	74	$2,4 \times 10^4$
По 3 районам [For 3 districts]	31	$8,5 \times 10^3$	$9,1 \times 10^3$	$4,7 \times 10^3$	$3,9 \times 10^3$	74	$3,4 \times 10^4$
Силос [Silage]							
Гордеевский [Gordeyevsky]	11	$2,4 \times 10^3$	$3,2 \times 10^3$	$1,2 \times 10^3$	$5,8 \times 10^2$	370	$1,1 \times 10^4$
Злынковский [Zlunkovsky]	9	$1,8 \times 10^3$	$4,5 \times 10^3$	$3,7 \times 10^2$	$3,0 \times 10^2$	37	$1,4 \times 10^4$
Климовский [Klimovsky]	20	$4,0 \times 10^2$	$3,4 \times 10^2$	$3,2 \times 10^2$	$2,9 \times 10^2$	74	$1,7 \times 10^3$
Клинцовский [Klintsovsky]	16	$6,0 \times 10^2$	$6,2 \times 10^2$	$3,7 \times 10^2$	$2,8 \times 10^2$	37	$3,4 \times 10^3$
Красногорский [Krasnogorsky]	14	$2,4 \times 10^3$	$3,8 \times 10^2$	$2,3 \times 10^3$	$2,4 \times 10^3$	$1,7 \times 10^3$	$2,8 \times 10^3$
Новозыбковский [Novozybkovsky]	14	$9,1 \times 10^2$	$5,9 \times 10^2$	$2,3 \times 10^2$	$1,5 \times 10^2$	37	$2,1 \times 10^3$
По 6 районам [For 6 districts]	68	$1,3 \times 10^3$	$2,2 \times 10^3$	$5,7 \times 10^2$	$4,5 \times 10^2$	37	$1,4 \times 10^4$

¹ Число обследованных хозяйств [Number of investigated farms].

Для силоса, так же, как и основных видов продукции растениеводства [14], не отмечено явной зависимости содержания ^{137}Cs в растениях от плотности выпадений, что объясняется проведением защитных мероприятий в 1986 г. Кроме того, следует учитывать, что авария на Чернобыльской АЭС произошла после высева семян кукурузы на силос. Вследствие этого корневое поступление в растения было возможно только из верхнего горизонта почвы, а вклад аэрального загрязнения был

незначительным вследствие недостаточного развития биомассы.

Среднее значение содержания ^{137}Cs в сене юго-западных районов Брянской области было примерно в 10 раз больше, чем в силосе, и почти в два раза больше, чем в сенаже. Эти отношения значительно варьируют в зависимости от района и меняются от 4,5 (Гордеевский район) для до 26 (Новозыбковский район) для силоса и от 1,4 (Климовский район) до 3,2 (Новозыбковский район) для сенажа.

Динамика содержания ^{137}Cs в продукции растениеводства

Данные по динамике изменения концентраций ^{137}Cs в сене, сенаже, силосе и зеленых кормах представлены на рисунках 3–6. Из приведенных данных (см. рис. 3–6) видно, что за период времени с 1987 до 2021 г. содержание ^{137}Cs в кормах уменьшилось от 100 раз в силосе до 260 раз в сенаже. Вклад радиоактивного распада в снижение загрязнения продукции был незначителен (менее 1%) по сравнению с вкладом в снижение загрязнения продукции применения защитных и реабилитационных мероприятий, а также с вкладом природных геохимических процессов, определяющих необменную сорбцию цезия в почвенно-поглощающем комплексе почвы.

Динамика снижения концентраций ^{137}Cs как в сене, так и в сенаже, силосе и зеленых кормах носила неравномерный характер и отличалась в различные периоды времени после аварии. Качественный анализ этих данных позволяет в многих случаях выделить 4 периода времени ($T^1_{1/2}$, $T^2_{1/2}$, $T^3_{1/2}$ и $T^4_{1/2}$), в течение которых интенсивность снижения ^{137}Cs в кормах существенно отличалась, а именно первый период после аварии (с 1987 до 1993 г.), восстановительный период (с 1994 по 2006 г.), третий (с 2007 по 2015 г.) – период активного внедрения ФЦП и последствия от применения реабилитационных мероприятий. В качестве четвертого периода времени (с 2016 по 2021 г.) можно рассматривать отдаленный период после аварии на Чернобыльской АЭС. Верхний индекс, указанный в периодах полуснижения на рисунках 3–6, соответ-

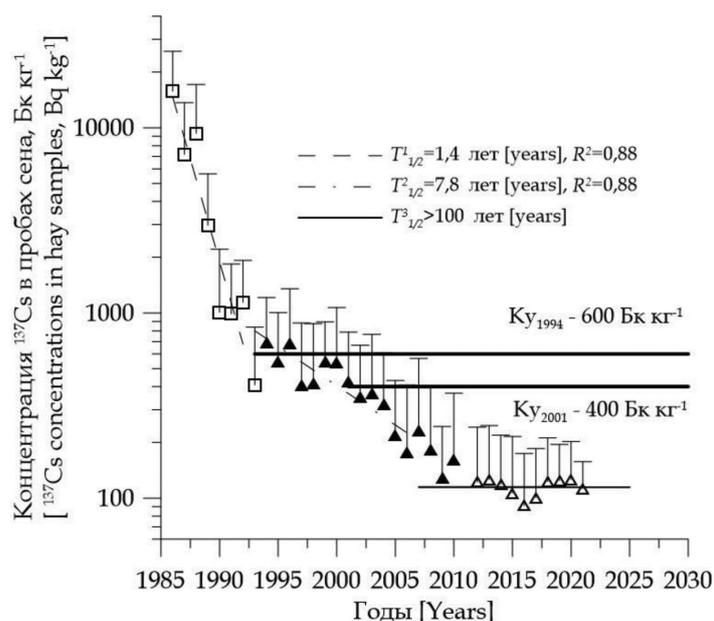


Рис. 3. Динамика снижения концентрации ^{137}Cs в сене юго-западных районов Брянской области после аварии на Чернобыльской АЭС

[Fig. 3. Dynamics of ^{137}Cs concentrations in hay produced in southwestern districts of Bryansk region after the Chernobyl accident]

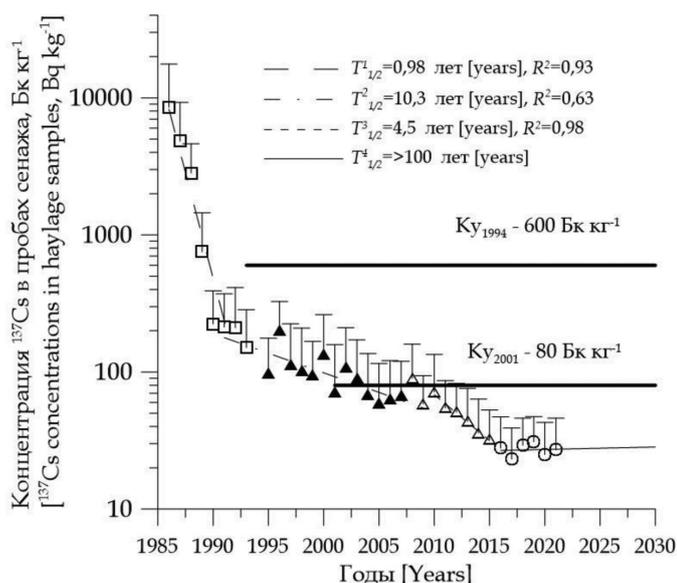


Рис. 4. Динамика снижения содержания ^{137}Cs в сенаже, производимом в юго-западных районах Брянской области, после аварии на Чернобыльской АЭС

[Fig. 4. Dynamics of ^{137}Cs concentrations in haylage produced in southwestern districts of Bryansk region after the Chernobyl accident]

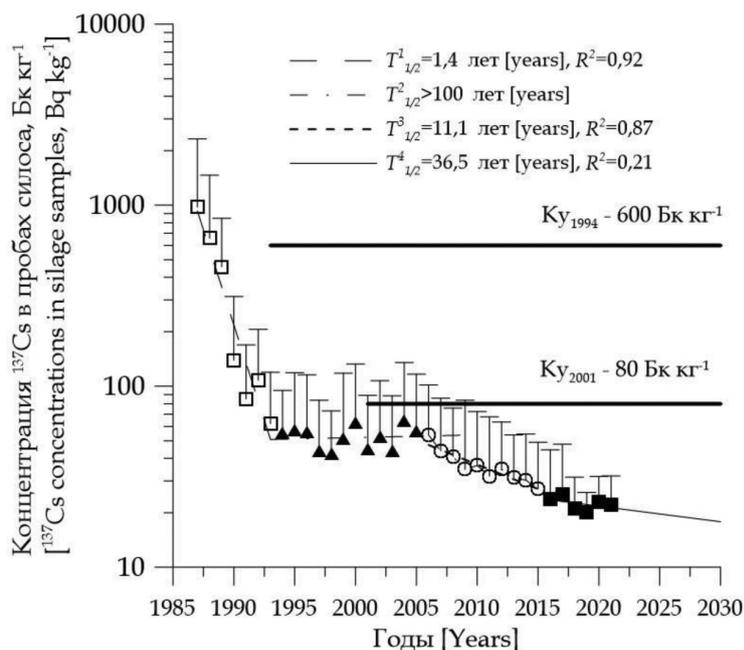


Рис. 5. Динамика снижения содержания ^{137}Cs в силосе, производимых в юго-западных районах Брянской области, после аварии на Чернобыльской АЭС

[Fig. 5. Dynamics of ^{137}Cs concentrations in silage produced in southwestern districts of Bryansk region after the Chernobyl accident]

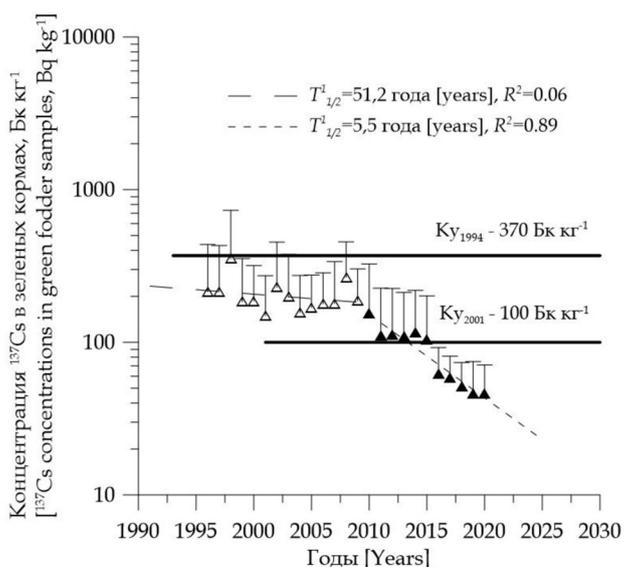


Рис. 6. Динамика снижения содержания ^{137}Cs в зеленых кормах, производимых в юго-западных районах Брянской области после аварии на Чернобыльской АЭС. Данные, соответствующие выделенным периодам после аварии, представлены разными символами
[Fig. 6. Dynamics of ^{137}Cs concentrations in green fodder produced in southwestern districts of Bryansk region after the Chernobyl accident. Data corresponding to different periods after the accident are represented by different symbols]

ствует номеру периода. Периоды наблюдений для зеленых кормов включали только 2 временных интервала, в пределах которых периоды полуснижения отличались.

Активное применение этих мероприятий, включающих известкование кислых почв и внесение повышенных доз минеральных удобрений, способствовало быстрому снижению загрязнения кормов в период времени с 1987 до 1991 г. По сравнению с агрохимическими мероприятиями на пахотных угодьях, культуртехнические мероприятия обладают пролонгированным эффектом, поэтому существенное снижение содержания ^{137}Cs в кормах от-

мечалось практически до середины 1990-х гг. Для этого периода времени после Чернобыльской аварии характерны самые короткие периоды полуснижения содержания радионуклида в продукции – от 0,98 (сенаж) до 1,4 года (сено, силос).

В первой половине 1990-х гг. (второй период) возможности в проведении реабилитации сельскохозяйственных угодий резко сократились и объемы применения мероприятий не соответствовали требуемой практике окультуривания сенокосов и пастбищ (см. рис. 2) [1, 5]. Кроме того, повторное проведение коренного улучшения лугов

характеризуется существенно меньшей эффективностью по критерию снижения накопления ^{137}Cs растениями. Это также привело к замедлению темпов снижения поступления радионуклидов в растения. Следует отметить отличия в темпах снижения содержания ^{137}Cs в сене, сенаже, для которых эти периоды, рассчитанные для 1993–2006 гг., составили 8–10 лет, и в силосе, для которого период полуснижения превысил 50 лет. Это означает, что прекращение или сильное сокращение проведения мероприятий физически приводило к увеличению поступления ^{137}Cs в растения, которое не могло быть компенсировано радиоактивным распадом.

Внедрение мероприятий ФЦП (третий период: 2007–2016 гг.), обеспечивших кратное увеличение объемов проведения мероприятий, позволило восстановить темпы снижения загрязнения продукции и нивелировать ухудшение плодородия почв. Периоды полуснижения составляли от 4,5 до 10,8 года в зависимости от вида кормов и особенностей проведения реабилитационных мероприятий, характерных для данных видов кормов. Наиболее длительный период полуснижения отмечался для силоса, который является пропашной культурой. С учетом последствия мероприятий, эффект от их применения ощущался до 2015 г.

В последующем (четвертый период: 2016–2021 гг.) динамика снижения содержания ^{137}Cs в кормовых растениях определялась разнонаправленными процессами, то есть увеличением поступления ^{137}Cs в растения в результате снижения плодородия сенокосов и пастбищ (сено, сенаж и зеленые корма), а также пахотных почв (силос), которое компенсировалось естественным снижением

биологической доступности радионуклидов в почвах под действием геохимических процессов. Начиная с 2016 г., периоды полуснижения составляли для сена и сенажа более 50 лет, а для силоса – более 30 лет. Также можно отметить тенденцию к замедлению темпов уменьшения содержания радионуклидов и в зеленых кормах.

На протяжении всего периода после аварии наибольшие уровни содержания ^{137}Cs отмечались в сене, что связано как с особенностями его технологической заготовки (высушивание), так и с тем, что кукуруза на силос возделывается на пахотных угодьях. При этом до 2010 г. содержание ^{137}Cs во всех видах кормов могло превышать контрольные уровни 1993 г., рассчитанные, исходя из содержания ^{137}Cs в молоке 370 Бк л⁻¹. В этот период дальнейшее снижение радионуклидов в продукции животноводства обеспечивалось в основном применением ферроцинсодержащих препаратов. В результате внедрения мероприятий ФЦП удалось достичь снижения содержания ^{137}Cs в кормах до уровней, соответствующих требованиям контрольных уровней 2001 г., которые соответствовали требованиям СанПиН 2.3.2.1078-01. Одновременно это подтверждает обоснованность отмены контрольных уровней 2001 г., поскольку в период с 2001 по 2013 г. они были технически и экономически недостижимы.

Периоды полуснижения содержания ^{137}Cs в продукции растениеводства

Эффективные и экологические периоды полуснижения содержания ^{137}Cs в кормах приведены в таблице 5. Данные для 1986 г. анализировались отдельно, поскольку

Таблица 5

Эффективные периоды полуснижения содержания ^{137}Cs в пробах кормов, отобранных в юго-западных районах Брянской области в 1987–2021 гг.

[Table 5

Effective half-lives of ^{137}Cs concentrations in feedstuffs samples taken in the southwestern districts of the Bryansk region in 1987–2021]

Районы [Districts]	$T'_{1/2}$, лет [years]	R^2	$T^2_{1/2}$, лет [years]	R^2	$T^3_{1/2}$, лет [years]	R^2
Сено [Hay]						
Гордеевский [Gordeyevsky]	2,1	0,98	18,2	0,56	23,1	0,25
Злынковский [Zlunkovsky]	1,0	0,92	21,7	0,54	25,7	0,21
Климовский [Klimovsky]	1,9	0,70	6,2	0,88	13,3	0,61
Клинцовский [Klintsovsky]	1,3	0,81	5,8	0,84	8,9	0,54
Красногорский [Krasnogorsky]	0,67	0,78	10,2	0,46	14,8	0,47
Новозыбковский [Novozybkovsky]	0,9	0,81	11,4	0,56	9,6	0,19
Стародубский [Starodubsky]	–	–	6,1 ¹	0,76	10,2	0,62
Сенаж [Haylage]						
Гордеевский [Gordeyevsky]	1,2	0,98	5,5	0,67	–	–
Злынковский [Zlunkovsky]	0,57	0,99	9,8	0,61	–	–
Климовский [Klimovsky]	0,71	0,86	11,4	0,70	–	–
Клинцовский [Klintsovsky]	2,8	0,72	11,5	0,45	>50	0,1
Красногорский [Krasnogorsky]	1,4	0,96	5,0	0,76	>50	0,01
Новозыбковский [Novozybkovsky]	0,58	0,99	18,4	0,21	>50	–
Стародубский [Starodubsky]	–	–	11,5 ¹	0,34	8,9	0,89

Районы [Districts]	$T_{1/2}^1$ лет [years]	R^2	$T_{1/2}^2$ лет [years]	R^2	$T_{1/2}^3$ лет [years]	R^2
Силос [Silage]						
Гордеевский [Gordeyevsky]	1,9	0,89	5,1	0,89	>50	0,34
Злынковский [Zlunkovsky]	1,0	0,99	34,7	0,14	>50	0,24
Климовский [Klimovsky]	0,83	0,90	15,4	0,48	>50	–
Красногорский [Krasnogorsky]	1,73	0,99	4,4	0,93	>50	0,13
Новозыбковский [Novozybkovsky]	1,32	0,90	11,0	0,49	18,7	0,54
Стародубский [Starodubsky]			4,1 ¹	0,55	20,4	0,11
Зеленые корма [Green fodder]						
Гордеевский [Gordeyevsky]	–	–	>30,17 ²	0,37	>50	–
Злынковский [Zlunkovsky]	–	–	4,9 ²	0,95	>50	0,32
Климовский [Klimovsky]	–	–	34,7 ²	0,48	18,7	0,39
Клинцовский [Klintsovsky]	–	–	11,0 ³	0,73	>50	–
Красногорский [Krasnogorsky]	–	–	11,9 ²	0,64	>50	–
Новозыбковский [Novozybkovsky]	–	–	>30,17 ²	0,66	24,8	0,42

¹ Период полуснижения рассчитывался на основе данных с 1993 по 2011 г.; ² Период полуснижения рассчитывался на основе данных с 1996 по 2011 г.; ³ Период полуснижения рассчитывался на основе данных с 2008 по 2016 г. [¹the half-life was calculated based on data from 1993 to 2011]; [²the half-life was calculated based on data from 1996 to 2011]; [³the half-life was calculated based on data from 2008 to 2016]

загрязнение продукции кормопроизводства в год аварии определялось как аэральным, так и корневым поступлением. Интервалы времени, в течение которых проводился отбор проб, отличались как для отдельных районов, так и для отдельных видов кормов. Наиболее длинные ряды данных по содержанию ¹³⁷Cs в кормах (с 1987 по 2021 г.) были получены для сена и силоса, данные для сенажа для большей части районов находились в диапазоне времени с 1987 по 2007–2020 гг. Отбор проб зеленых кормов начали проводить со задержкой. В Гордеевском, Климовском, Красногорском и Новозыбковском районах отбор проб зеленых кормов был начат в 1996 г., а в Злынковском и Клинцовском районах – только после 2006 г.

Данные, представленные на рисунках 3–6, показывают, что динамика содержания ¹³⁷Cs в кормах носила неоднородный характер, а данные позволяют выделить несколько периодов времени, различия в пределах каждого из которых были довольно близки, а периоды полуснижения между которыми отличались. К такого рода периодам относятся интервалы времени с 1987 по 1993 г., с 1994 по 2006 г. и с 2007 по 2021 г.

Первый период охватывает промежуток времени, когда мероприятия применялись в максимально возможных масштабах, а площади сенокосов и пастбищ, охваченные этими мероприятиями, постоянно увеличивались.

Второй период включает промежуток времени, когда объемы проведения защитных мероприятий сократились, третий период включает промежуток времени, когда в некоторых районах сказывался эффект от проведения мероприятий в рамках ФЦП. В большинстве районов эффект от ранее проведенных мер был практически нивелирован, и снижение загрязнения продукции определялось главным образом естественным снижением биологической доступности ¹³⁷Cs в почве и радиоактивным распадом. Вторые периоды полуснижения (с 1996 по 2006 г.) находятся в диа-

пазоне от 5,8 до 46,2 лет, а третьи – от 8,9 года до более 50 лет. Данные таблицы 5 также показывают, что периоды полуснижения сильно варьируют между отдельными районами, отражая масштабы проведения мероприятий в этих районах. Кроме того, недостаточное количество информации, а также отличий в объеме мероприятий, проводимых в рамках ФЦП в отдельных районах, не позволили достоверно разделить 3-й и 4-й периоды, а данные приведены только для 3-го периода, объединяющего данные с 2007 по 2021 г. Для этого периода характерны более длинные значения $T_{1/2}^2$, превышающие во многих случаях 50 лет. Это означает, что концентрации ¹³⁷Cs в кормах находились примерно на одном уровне, а снижение содержания радионуклида в кормах вследствие радиоактивного распада и сорбции цезия в почве компенсировалось ростом перехода ¹³⁷Cs в кормовые растения в результате снижения эффективности контрмер. Вследствие этого оценка периодов полуснижения, превышающих 50 лет, требует наблюдений в течение промежутков времени, сопоставимых с радиоактивным распадом, а значения R^2 , оцененные для периодов полуснижения на основе существующих данных, составляют величины менее 0,1.

Первый период полуснижения содержания ¹³⁷Cs в сене (1987–1993 гг.) находится в диапазоне от 0,67 до 1,2 года, в сенаже и силосе – от 0,57 до 2,7 года, при значениях R^2 в пределах от 0,64 до 0,99. Отметим, что эти данные в целом согласуются с данными наблюдений в других регионах мира [22–24]. Более длинные периоды полуснижения содержания в кормах были характерны для Стародубского района, что связано с низкими уровнями загрязнения сенокосов и пастбищ и, как следствие, менее интенсивным проведением мероприятий.

Объемы проведения мероприятий даже на единицу площади кормовых угодий в отдельных районах сильно отличались (см. табл. 2). Это привело к существенным от-

личиям в динамике изменения содержания ^{137}Cs в кормах, производимых в различных районах, на протяжении всего периода времени после аварии на Чернобыльской АЭС (рис. 7). Таким образом для корректной интерпретации динамики изменения содержания ^{137}Cs в кормах и оценки трендов в ее изменении необходимо привлечение данных по проводимым мероприятиям и анализ информации по изменению концентраций ^{137}Cs в кормах на протяжении достаточно длинных рядов наблюдений. В качестве примера на рисунке 7 приведены данные по содержанию этого радионуклида в зеленых кормах (Новozyбковский район) и сене Гордеевского района Брянской области. Из приведенных данных (см. рис. 7А) видно, что в период с 1996⁶ по 2008 г. отмечалось медленное снижение содержания ^{137}Cs в зеленых кормах Новozyбковского района с периодом полуснижения 16,1 года.

В период проведения ФЦП было отмечено почти двукратное снижение и затем с 2013 по 2021 г. дальнейшее снижение с периодом 24,8 года. В то же время средний период полуснижения за все годы наблюдений составил 6,7 года. Очевидно, что использование этой величины для прогноза уровней загрязнения зеленых кормов и молока некорректно и может привести к большому занижению фактических уровней. Аналогичный вывод можно сделать и при оценке данных по содержанию ^{137}Cs в сене, производимом в Гордеевском районе (см. рис. 7В). Так, использование для прогноза данных с 1996 по 2011 г. приводит к занижению оценок, сделанных для периода времени после 2021 г., а использование средних данных с 1996 по 2021 г. приводит к завышению таких результатов.

Динамика снижения содержания ^{137}Cs в сене в зонах с различной плотностью загрязнения почв сельскохозяйугодий

Для оценки различий в динамике снижения ^{137}Cs в кормах в зонах с различным применением реабилитационных мероприятий имеющаяся информация была разделена на 3 группы, отличающихся по плотности загрязнения сенокосов и пастбищ: меньше 185 kBq/m^2 , от 185 kBq/m^2 до 555 kBq/m^2 и более 555 kBq/m^2 (рис. 8).

Хозяйства, в которых плотность загрязнения кормовых угодий была менее 185 kBq/m^2 , относятся к категории хозяйств, в которых проведение реабилитационных мероприятий не требовалось. В хозяйствах с плотностью загрязнения между 185 и 555 kBq/m^2 защитные и реабилитационные мероприятия носили ограниченный характер, хозяйства с плотностью загрязнения более 555 kBq/m^2 были отнесены к категории «критических» хозяйств, проведение мероприятий в которых рассматривалось как приоритетная задача.

Из данных, представленных на рисунке 8, видно, что динамика снижения содержания ^{137}Cs в сене в хозяйствах с различной плотностью загрязнения кормовых угодий отличалась. Так, после периода быстрого снижения концентраций радионуклидов в сене темпы снижения загрязнения в сене замедлились. При этом динамика снижения ^{137}Cs в сене в зонах с плотностью выпадений менее 185 kBq/m^2 и плотностью выпадений между 185 и 555 kBq/m^2 была довольно близка, а снижение загрязнения сена в зоне с плотностью загрязнения сенокосов более 555 kBq/m^2 происходило в первый период после аварии быстрее.

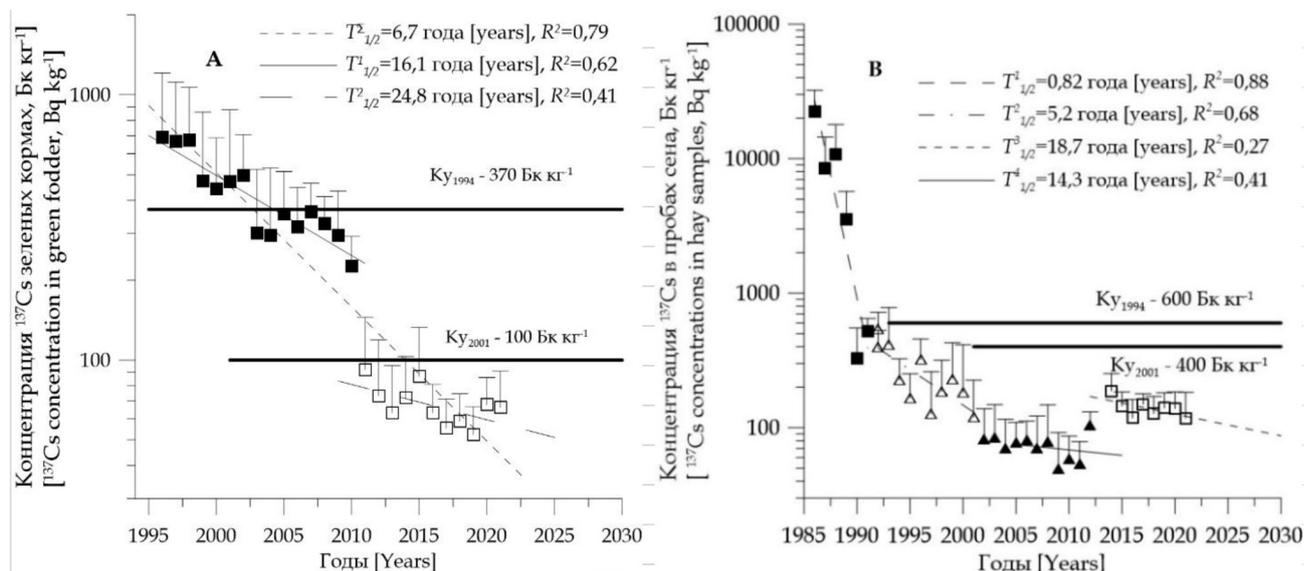


Рис. 7. Динамика снижения содержания ^{137}Cs в зеленых кормах Новozyбковского (А) и сене Гордеевского (В) районов Брянской области

[Fig. 7. Dynamics of ^{137}Cs concentrations in green fodder produced in Novozybkovsky (A) and hay of Gordeyevsky (B) districts of the Bryansk region]

⁶ Начало мониторинга содержания ^{137}Cs в зеленых кормах.

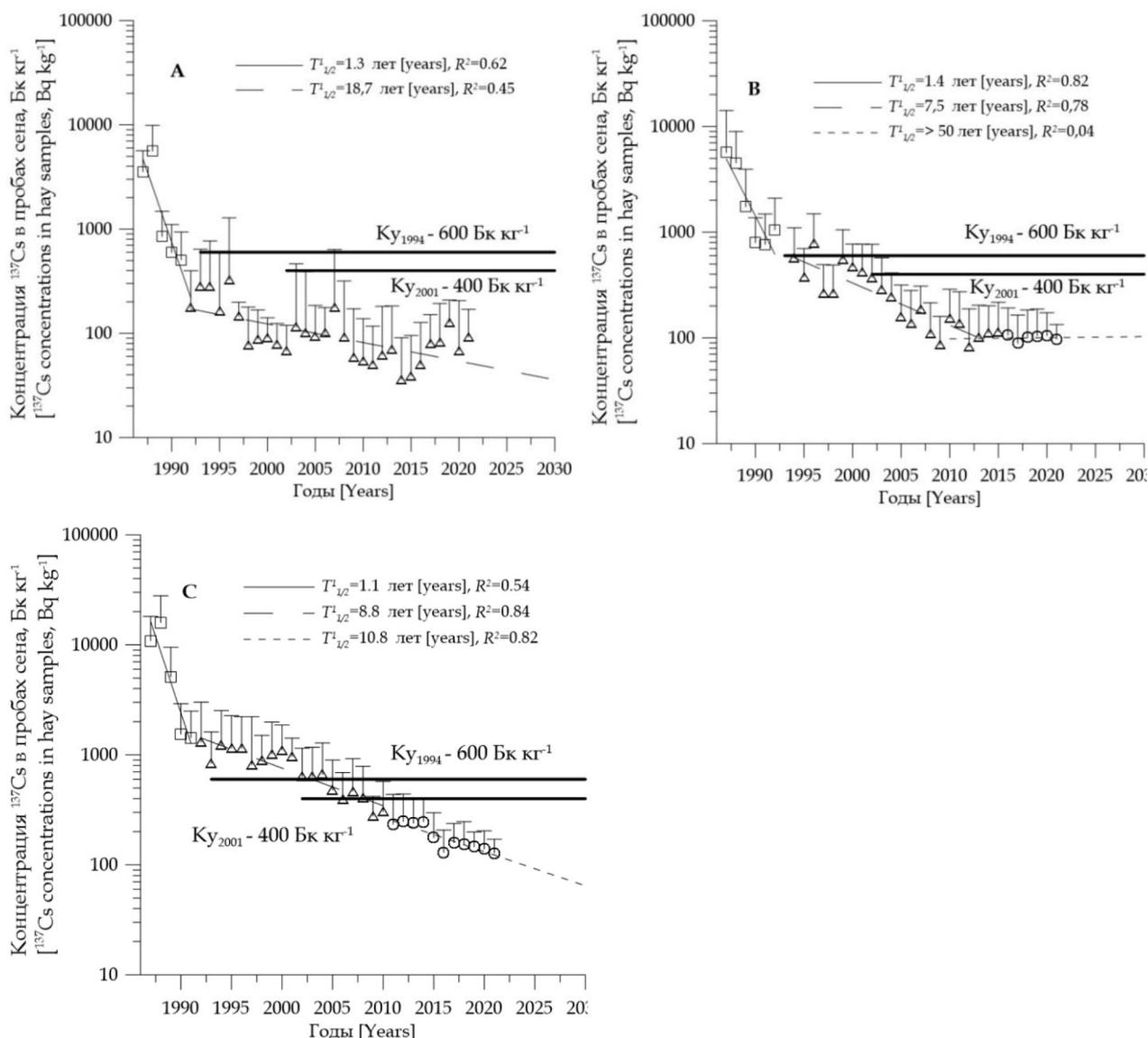


Рис. 8. Динамика снижения содержания ^{137}Cs в сене в хозяйствах с плотностью выпадений менее 185 kBq/m^2 (А), с плотностью выпадений между 185 и 555 kBq/m^2 (В) и с плотностью выпадений более 555 kBq/m^2 (С)
[Fig. 8.] Dynamics of ^{137}Cs concentration reduction in hay on farms with deposition densities below 185 kBq/m^2 (A), with deposition densities between 185 and 555 kBq/m^2 (B), and with the deposition densities above 555 kBq/m^2 (C)

Период полуснижения содержания ^{137}Cs в сене, получаемом в зоне с загрязнением угодий менее 185 kBq/m^2 , существенно превышал периоды полуснижения, рассчитанные для территорий с плотностью загрязнения сенокосов между 185 и 555 kBq/m^2 и более. Отмеченные закономерности можно объяснить прекращением проведения культуртехнических мероприятия или более значительным снижением объемов их проведения в хозяйствах с низкими уровнями загрязнения, нежели в зоне с плотностью загрязнения более 185 kBq/m^2 .

Заключение

Анализ данных по закономерностям изменения содержания ^{137}Cs в кормах в целом подтверждает выводы, сделанные при изучении закономерностей накопления этого радионуклида в продукции растениеводства, представ-

ленные в нашей предыдущей публикации [19]. Данные показывают, что динамика содержания радиоцезия в кормах во многом определялась масштабами проведения защитных мероприятий, особенно в периоды времени, когда их применение было достаточно интенсивным. Представленные данные содержат параметры снижения содержания ^{137}Cs в кормах: сене, сенаже, силосе и зеленых кормах с учетом особенностей юго-западных районов Брянской области, наиболее пострадавших после аварии на Чернобыльской АЭС. Показано, что периоды полуснижения с 1987 по 1993 г. находились в диапазоне от 0,58 до 1,4 года, 2-е периоды – от 4,4 до 34,7 лет и 3-и – от 8,9 до более чем 50 лет. Отмечены отличия в динамике снижения содержания ^{137}Cs в кормовых растениях в зонах с различной плотностью загрязнения менее 185 kBq/m^2 , от 185 kBq/m^2 до 555 kBq/m^2 и выше 555 kBq/m^2 . Первые пе-

риоды полуснижения в хозяйствах, относящихся ко всем зонам, были довольно близки, а второй период, рассчитанный для зоны с наименьшими уровнями загрязнения кормовых угодий (менее 185 Бк/м²), существенно превышал периоды для территорий с более высокими уровнями загрязнения. Периоды полуснижения, рассчитанные для сельскохозяйственных предприятий, относящихся к различным зонам загрязнения, существенно отличались, что определяет необходимость учитывать специфические условия хозяйств юго-западных районов Брянской области, пострадавших после аварии на Чернобыльской АЭС при определении стратегии перехода этих районов к нормальным условиям жизнедеятельности [25].

Сведения о личном вкладе авторов в работу над статьей

Фесенко С.В. – разработка концепции исследования; анализ и интерпретация данных; написание текста статьи или ее редактирование; утверждение окончательного варианта статьи для публикации; согласие нести ответственность за все аспекты статьи, обеспечивая надлежащее расследование и решение вопросов, связанных с точностью или целостностью любой части работы.

Прудников П.В. – сбор, анализ и интерпретация данных; согласие нести ответственность за все аспекты статьи, обеспечивая надлежащее расследование и решение вопросов, связанных с точностью любой части работы.

Исамов Н.Н. – сбор, анализ и интерпретация данных; согласие нести ответственность за все аспекты статьи, обеспечивая надлежащее расследование и решение вопросов, связанных с точностью любой части работы.

Емлютина Е.С. – обработка, анализ и интерпретация данных; согласие нести ответственность за все аспекты статьи, обеспечивая надлежащее расследование и решение вопросов, связанных с точностью любой части работы.

Епифанова И.Э. – обработка, анализ и интерпретация данных; согласие нести ответственность за все аспекты статьи, обеспечивая надлежащее расследование и решение вопросов, связанных с точностью или целостностью любой части работы.

Шубина О.А. – анализ и интерпретация данных; редактирование текста статьи; утверждение окончательного варианта статьи для публикации; согласие нести ответственность за все аспекты статьи, обеспечивая надлежащее расследование и решение вопросов, связанных с точностью или целостностью любой части работы.

Благодарности

Авторы выражают свою признательность рецензентам.

Информация о конфликте интересов

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов при выполнении работы и подготовки данной статьи.

Сведения об источнике финансирования

Данные исследования выполнены в рамках фундаментальных и прикладных исследований по Программе деятельности федерального государственного бюджетного учреждения «Национальный исследовательский центр «Курчатовский институт»» на 2023–2027 годы (комплексная тема 5П.7. «Прикладные генетические и биотех-

нологические исследования для сельского хозяйства»).

Литература

1. Радиоэкологические последствия аварии на Чернобыльской АЭС: биологические эффекты, миграция, реабилитация загрязненных территорий: Монография. Под ред. Санжаровой Н.И. и Фесенко С.В. М.: РАН, 2018. 278 с. URL: <https://rirae.ru/index.php/deyatelnost/publikatsii-fgbnu-vniirae/444-osnovnye-nauchnye-publikatsii-sotrudnikov-fgbnu-vniirae-v-2018-g> (Дата обращения: 22.01.2023).
2. Романович И.К., Историк О.А., Брук Г.Я., и др. К вопросу о необходимости применения радиологических мер защиты населения, проживающего на радиоактивно загрязненных в результате аварии на Чернобыльской АЭС территориях, через 30 лет после аварии. Сборник докладов всероссийской научно-практической конференции «Профилактическая медицина – 2016», 15-16 ноября 2016 года. Под ред. А.В. Мельцера, И.Ш. Якубовой. Ч. 1. СПб.: СЗГМУ, 2016. С. 149–151.
3. Балонов М.И. (редактор). Справочник по радиационной обстановке и дозам облучения, полученным в 1991 году населением территорий Российской Федерации, подвергшихся радиоактивному загрязнению в результате аварии на Чернобыльской АЭС. СПб.: «Ариадна – Аркадия», 1993.
4. Jacob P., Fesenko S., Firsakova S.K., et al. Remediation strategies for rural territories contaminated by the Chernobyl accident // *Journal of Environmental Radioactivity*. 2001. Vol. 56. P. 51-76.
5. 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 // *Science of the Total Environment*. 2007. Vol. 383. P. 1-24.
6. Alexakhin R.M., Fesenko S.V., Sanzharova N.I., et al. Serious radiation accidents and the radiological impact on agriculture // *Radiation Protection Dosimetry*. 1996. Vol. 64. P. 37–42.
7. 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 // *Journal of Environmental Radioactivity*. 2001. Vol. 56. P. 77-98.
8. 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.
9. Fesenko S.V., Alexakhin R.M., Sanzharova N.I., Spiridonov S.I. Dynamics of ¹³⁷Cs concentration in agricultural products in areas of Russia contaminated as a result of the accident at the Chernobyl nuclear power plant // *Radiation Protection Dosimetry*. 1995. Vol. 60, № 2. P. 155-166.
10. Маркина З.Н., Курганов А.А., Воробьев Г.Т. Радиоактивное загрязнение продукции растениеводства Брянской области. Брянск: Брянский Центр «Агрохимрадиология», 1997. 242 с.
11. Прудников П.В. Использование агрономических руд и новых комплексных минеральных удобрений на радиоактивно загрязненных почвах. Брянск: Брянский Центр «Агрохимрадиология», 2012. 123 с.
12. Alexakhin R.M., Sanzharova N.I., Fesenko S.V., et al. Chernobyl radionuclide distribution, migration, and environmental and agricultural impacts // *Health Physics*. 2007. Vol. 93, No 5. P. 418–426.
13. Fesenko S.V., Sanzharova N.I., Karpenko Ye.I., et al. Radioecological monitoring and its role in ensuring the safety of nuclear power plants // *Nuclear Energy and Technology*. 2022. Vol. 8, No 1. P. 43-48. <https://doi.org/10.3897/nucet.8.82619>.
14. Фесенко С.В., Исамов Н.Н., Прудников П.В., Емлютина Е.С. Радиоэкологическое обоснование контрольных уровней содержания ¹³⁷Cs в кормах сельскохозяйственных животных // *Радиационная биология. Радиоэкология*. 2021. Т. 61, № 6. С. 652–663.

15. Smith J.T., Fesenko S.V., Howard B.J., et al. Temporal Change in Fallout ^{137}Cs in Terrestrial and Aquatic Systems: A Whole Ecosystem Approach // *Environmental Science and Technology*. 1999. Vol. 33. P. 49-54.
16. 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 // *Radiation Protection Dosimetry*. 1997. Vol. 69, No 4. P. 289–299.
17. 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.
18. Fesenko S.V., Prudnikov P.V., Isamov N.N., et al. Dynamics of ^{137}Cs concentration in fodder in the long-term after the Chernobyl accident // *Biology Bulletin*. 2022. Vol. 49, No 12. P. 153–162.
19. Фесенко С. В. Прудников П.В., Емлютина Е.С. и др. Динамика содержания ^{137}Cs в сельскохозяйственной продукции Брянской области после аварии на ЧАЭС: зерно, картофель и овощи // *Радиационная гигиена*. 2022. Т. 15, № 4. С. 45-57.
20. Balonov M., Kashparov V., Nikolaenko A., et al. Harmonization of standards for permissible radionuclide activity concentrations in foodstuffs in the long term after the Chernobyl accident // *Journal of Radiological Protection*. 2018. Vol. 38. P. 854–867.
21. 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.
22. Fesenko S., Shinano T., Onda Yu., Dercon G. Dynamics of radionuclide activity concentrations in weed leaves, crops and of air dose rate after the Fukushima Daiichi Nuclear Power Plant accident // *Journal of Environmental Radioactivity*. 2020. Vol. 222. P.106347.
23. Tagami K., Hashimoto S., Kusakabe M., et al. Pre- and post-accident environmental transfer of radionuclides in Japan: lessons learned in the IAEA Modaria II programme // *Journal of Radiological Protection*. 2022. Vol. 42, № 2. 020509. doi: 10.1088/1361-6498/ac670c.
24. 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 // *Journal of Environmental Radioactivity*. 2015. Vol.141. P.138–145.
25. Санжарова Н.И., Фесенко С.В., Романович И.К., и др. Радиологические аспекты возвращения территорий Российской Федерации, пострадавших в результате аварии на Чернобыльской АЭС, к условиям нормальной жизнедеятельности // *Радиационная биология. Радиоэкология*. 2016. Т. 56, № 2. С. 322–335.

Поступила: 22.01.2023 г.

Фесенко Сергей Викторович – главный научный сотрудник Всероссийского научно-исследовательского института радиологии и агроэкологии. **Адрес для переписки:** 249032 Калужская область, г. Обнинск, Киевское шоссе, 109 км, Российская Федерация. E-mail: Corwin_17F@mail.ru

Прудников Петр Витальевич – директор Брянского центра «Агрохимрадиология», п. Мичуринский, Брянская область, Россия

Исамов Низам Низамович – заведующий лабораторией Всероссийского научно-исследовательского института радиологии и агроэкологии, Обнинск, Россия

Емлютина Евгения Сергеевна – научный сотрудник Всероссийского научно-исследовательского института радиологии и агроэкологии, Обнинск, Россия

Епифанова Ирина Эдуардовна – главный специалист Всероссийского научно-исследовательского института радиологии и агроэкологии, Обнинск, Россия

Шубина Ольга Андреевна – заместитель директора Всероссийского научно-исследовательского института радиологии и агроэкологии, Обнинск, Россия

Для цитирования: Фесенко С.В., Прудников П.В., Исамов Н.Н., Емлютина Е.С., Епифанова И.Э., Шубина О.А. Динамика содержания ^{137}Cs в кормах сельскохозяйственных животных в районах Брянской области, пострадавших после аварии на ЧАЭС // *Радиационная гигиена*. 2023. Т. 16, № 1. С. 104-119. DOI: 10.21514/1998-426X-2023-16-1-104-119

Dynamics of ^{137}Cs concentrations in agricultural products after the Chernobyl accident: cereals, potato, and vegetables

Sergey V. Fesenko¹, Pyotr V. Prudnikov², Nizam N. Isamov¹, Evgeniya S. Emlyutina¹, Irina E. Epifanova¹, Olga A. Shubina¹

¹ Russian Institute of Radiology and Agroecology, Obninsk, Russia

² Bryansk Center of Agrokhimradiologia, Michurinskiy settlement, Bryansk Region, Russia

The paper continues the cycle of publications addressed to the study of regularities of ^{137}Cs content changes in agricultural products after the Chernobyl accident. The aim of the studies was to analyze the information describing changes in the ^{137}Cs concentrations in agricultural animal forage: hay, haylage, silage and green fodder in the southwestern districts of the Bryansk region affected by the contamination after the ChNPP accident. The data on countermeasures in the fodder production are given and the system of radiological monitoring of fodder contamination is described. It is shown that the dynamics of changes in the ^{137}Cs concentrations in fodder was mainly determined by the dynamics of implementation of remedial measures. The effective half-lives of ^{137}Cs concentration in forages during the first period after the accident (1987–1990) varied from 0.57 to 2.7 years. Subsequently (1991–2021) the decrease in feed contamination slowed down and the half-lives ranged from 8.0 to 50.0 years and longer depending on the scope of remediation and the characteristics of the plants used for the animal feed production.

Key words: Chernobyl nuclear power plant, agricultural products, southwestern districts of Bryansk region, monitoring in agriculture, ^{137}Cs .

Authors' contribution

Sergey V. Fesenko – development of research concept; analysis and interpretation of data; writing or editing of the paper; approval of the final version of the paper for publication; agreement to be responsible for all aspects of the paper, ensuring proper investigation and resolution of issues related to the accuracy or integrity of any part of the paper.

Pyotr V. Prudnikov – data collection, analysis, and interpretation; agreement to be responsible for all aspects of the paper, ensuring proper investigation and resolution of issues related to the accuracy of any part of the paper.

Nizam N. Isamov – data collection, analysis, and interpretation; agreement to be responsible for all aspects of the paper, ensuring proper investigation and resolution of issues related to the accuracy of any part of the paper.

Evgeniya S. Emlyutina – data processing, analysis, and interpretation; agreement to be responsible for all aspects of the paper, ensuring proper investigation and resolution of issues related to the accuracy of any part of the paper.

Irina E. Epifanova – data processing, analysis, and interpretation; agreement to be responsible for all aspects of the paper, ensuring proper investigation and resolution of issues related to the accuracy or integrity of any part of the paper.

Olga A. Shubina – analysis and interpretation of data; editing of the text of the paper; approval of the final version of the paper for publication; agreement to be responsible for all aspects of the paper, ensuring proper investigation and resolution of issues related to the accuracy or integrity of any part of the paper.

Acknowledgements

The authors express their gratitude to the reviewers.

Conflict of interest

The authors declare no conflict of interest in the performance of the work and preparation of this article.

Information about the source of funding

These studies were carried out within the framework of fundamental and applied research on the Program of activities of The National Research Center «Kurchatov Institute» for 2023–2027 (complex project 5P.7. “Applied genetic and biotechnological research for agriculture”).

References

1. Radioecological consequences of the Chernobyl accident: biological effects, migration, rehabilitation of contaminated areas: Monograph Edited by Sanzharova N.I. and Fesenko S.V. Moscow; RAS. 2018. 278 p. URL: <https://rirae.ru/index.php/deyatelnost/publikatsii-fgbnu-vniirae/444-osnovnye-nauchnye-publikatsii-sotrudnikov-fgbnu-vniirae-v-2018-g>. (Available from January 22, 2023) (In Russian).
2. Romanovich IK, Istorik OA, Bruk GYa, Bratilova AA, Gromov AV. On the Need for Radiological Protection Measures for Population Living in Areas Radioactively Contaminated as a Result of the Chernobyl NPP Accident, 30 Years After the Accident. In: AV Meltser, ISh Yakubova. (eds.) “Preventive Medicine – 2016: Proceedings of the All-Russian Scientific-Practical Conference. November 15–16, 2016. Saint-Petersburg: Publishing house of Northwestern State Medical University named after I.I. Mechnikov; 2016. P. 149–151. (In Russian).
3. Balonov MI. (Editor). Handbook on Radiation Situation and Doses of Exposure Received in 1991 by Population of

Sergey V. Fesenko

All-Russian Research Institute of Radiology and Agroecology

Address for correspondence: Kievskoe highway, 109 km, Obninsk, Kaluga region, 249032, Russia; E-mail: Corwin_17F@mail.ru

- Russian Federation Territories Subjected to Radioactive Contamination as a Result of the Chernobyl Accident. St. Petersburg: Ariadna-Arkadia Publishing House; 1993. (In Russian)
4. Jacob P, Fesenko S, Firsakova SK, Likhtarev IA, Schotola C, Alexakhin RM, et al. Remediation strategies for rural territories contaminated by the Chernobyl accident. *Journal of Environmental Radioactivity*. 2001;56: 51-76.
 5. Fesenko SV, Alexakhin RM, Balonov MI, Bogdevitch IM, Howard BJ, Kashparov VA, et al. An extended critical review of twenty years of countermeasures used in agriculture after the Chernobyl accident. *Science of the Total Environment*. 2007;383: 1-24.
 6. Alexakhin RM, Fesenko SV, Sanzharova NI. Serious radiation accidents and the radiological impact on agriculture. *Radiation Protection Dosimetry*. 1996;64: 37-42.
 7. Fesenko SV, Jacob P, Alexakhin R, Sanzharova NI, Panov A, Fesenko GA, 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. *Journal of Environmental Radioactivity*. 2001;56: 77-98.
 8. Panov AV, Fesenko S.V., Sanzharova NI, Alexakhin RM, Prudnikov PV, Pasternak AD. Influence of agricultural countermeasures on exposure of the population of the territories affected by the Chernobyl accident. *Radiatsiya i risk = Radiation and risk*. 2006;46(2): 273-279. (In Russian).
 9. Fesenko SV, Alexakhin RM, Sanzharova NI, Spiridonov SI. 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. *Radiation Protection Dosimetry*. 1995;60(2): 155-166.
 10. Markina ZN, Kurganov, AA, Vorobyov GT. Radioactive contamination of crop production in Bryansk: Bryansk Center "Agrokhimradiology"; 1997. 242 p. (In Russian).
 11. Prudnikov PV. The use of agronomic ores and new complex mineral fertilizers on radioactively contaminated soils. Bryansk: Bryansk Center "Agrokhimradiology"; 2012. 232 p. (In Russian).
 12. Alexakhin RM, Sanzharova NI, Fesenko SV, Spiridonov SI, Panov AV. Chernobyl radionuclide distribution, migration, and environmental and agricultural impacts. *Health Physics*. 2007;93(5): 418-426.
 13. Fesenko SV, Sanzharova NI, Karpenko Yel, Isamov NN, Kuznetsov VK, Panov AV, et al. Radioecological monitoring and its role in ensuring the safety of nuclear power plants. *Nuclear Energy and Technology*. 2022;8(1): 43-48. <https://doi.org/10.3897/nucet.8.82619>.
 14. Fesenko SV, Isamov NN, Prudnikov PV, Emylutina ES. Radiological Justification of Reference Levels of ^{137}Cs Concentrations in Fodder of Agricultural Animals. *Radiation Biology. Radioecology*. 2021;61(6): 652-663. (In Russian).
 15. Smith JT, Fesenko SV, Howard BJ, Horril AD, Sanzharova NI, Alexakhin RM, et al. Temporal Change in Fallout ^{137}Cs in Terrestrial and Aquatic Systems: A Whole Ecosystem Approach. *Environmental Science and Technology*. 1999;33: 49-54.
 16. Fesenko SV, Colgan PA, Sanzharova NI, Lissianki KB, Vazquez C, Guardans R. 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. *Radiation Protection Dosimetry*. 1997;69(4): 289-299.
 17. Fesenko SV, Sanzharova NI, Lissianski KB, Alexakhin PM. Dynamics of ^{137}Cs transfer factors reduction in agricultural plants after the Chernobyl accident. *Radiation Biology. Radioecology*. 1998;38(2): 256-273. (In Russian).
 18. Fesenko SV, Prudnikov PV, Isamov NN, Emylutina ES, Titov I.E. Dynamics of ^{137}Cs concentration in fodder in the long-term after the Chernobyl accident. *Biology Bulletin*. 2022;49(12): 153-162.
 19. Fesenko SV, Prudnikov PV, Emylutina ES, Epifanova IE, Shubina OA. Dynamics of ^{137}Cs concentrations in agricultural products after the Chernobyl accident: cereals, potato, and vegetables. *Radiatsionnaya Gygiena = Radiation Hygiene*. 2022;15(4): 45-57. (In Russian).
 20. Balonov M, Kashparov V, Nikolaenko A, Berkovskyy V, Fesenko S. Harmonization of standards for permissible radionuclide activity concentrations in foodstuffs in the long term after the Chernobyl accident. *Journal of Radiological Protection*. 2018;38: 854-867.
 21. Geraskin SA, Fesenko SV, Chernyaeva LG, Sanzharova NI. Statistical methods of analysis of empirical distributions of radionuclide accumulation factors by plants. *Agricultural Biology*. 1991;1: 130-137. (In Russian).
 22. Fesenko S, Shinano T, Onda Yu, Dercon G. Dynamics of radionuclide activity concentrations in weed leaves, crops and of air dose rate after the Fukushima Daiichi Nuclear Power Plant accident. *Journal of Environmental Radioactivity*. 2020;222: 106347.
 23. Tagami K, Hashimoto S, Kusakabe M, Onda Y, Howard B, Fesenko S, et al. Pre- and post-accident environmental transfer of radionuclides in Japan: lessons learned in the IAEA Modaria II programme. *Journal of Radiological Protection*. 2022; 42(2). doi: 10.1088/1361-6498/ac670c.
 24. 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. *Journal of Environmental Radioactivity*. 2015;141: 138-145.
 25. Sanzharova NI, Fesenko SV, Romanovich IK, Marchenko TA, Razdayvodin AN, Panov AV, et al. Radiological aspects of return of the Russian Federation territories affected by Chernobyl accident to conditions of normal life activity. *Radiatsionnaya biologiya. Radioekologiya = Radiation Biology. Radioecology*. 2016;56(2): 322-335. (In Russian).

Received: January 22, 2023

For correspondence: Sergey V. Fesenko – Chief Researcher, All-Russian Research Institute of Radiology and Agroecology (Kievskoe highway, 109 km, Obninsk, Kaluga region, 249032, Russia; E-mail: Corwin_17F@mail.ru)

Pyotr V. Prudnikov – Director, Bryansk Center "Agrokhimradiology", Michurinskiy settlement, Bryansk region, Russia

Nizam N. Isamov – Head of Laboratory All-Russian Research Institute of Radiology and Agroecology, Obninsk, Russia

Evgeniya S. Emylutina – Researcher, All-Russian Research Institute of Radiology and Agroecology, Obninsk, Russia

Irina E. Epifanova – chief specialist of All-Russian Research Institute of Radiology and Agroecology, Obninsk, Russia

Olga A. Shubina – Deputy Director, All-Russian Research Institute of Radiology and Agroecology, Obninsk, Russia

For citation: Fesenko S.V., Prudnikov P.V., Isamov N.N., Emylutina E.S., Epifanova I.E., Shubina O.A. Dynamics of ^{137}Cs concentrations in agricultural products after the Chernobyl accident: cereals, potato, and vegetables. *Radiatsionnaya Gygiena = Radiation Hygiene*. 2023. Vol. 16, No. 1. P. 104-119. (In Russian). DOI: 10.21514/1998-426X-2023-16-1-104-119