

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

С.В. Фесенко¹, Н.Н. Исамов¹, Е.С. Емлютина¹, Е.И. Карпенко¹, В.А. Горяинов²

¹Всероссийский научно-исследовательский институт радиологии и агроэкологии Национального исследовательского центра «Курчатовский институт»,
Обнинск, Россия

²Департамент сельского хозяйства Брянской области, Брянск, Россия

Публикация продолжает цикл работ, посвященных изучению закономерностей изменения содержания ^{137}Cs в продукции сельскохозяйственного производства после аварии на Чернобыльской АЭС. Целью настоящих исследований являлся анализ данных, описывающих изменение содержания ^{137}Cs в молоке сельскохозяйственных животных. Представлена информация по проведению защитных мероприятий в животноводстве, описана система радиологического мониторинга загрязнения молока. Показано, что динамика изменения содержания ^{137}Cs в молоке определялась особенностями проведения агротехнических и ветеринарных мероприятий. Эффективные периоды полуснижения содержания ^{137}Cs в молоке в первый период после аварии (1987–1992 гг.) варьировали в пределах от 1 до 2,0 лет. В последующем снижение загрязнения кормов замедлилось, а периоды полуснижения варьировали от 5 до 25 лет в зависимости от объемов агротехнических и ветеринарных мероприятий.

Ключевые слова: Чернобыльская АЭС, агропромышленное производство, молоко сельскохозяйственных животных, юго-западные районы Брянской области, радиационный мониторинг, ^{137}Cs .

Введение

Авария на Чернобыльской АЭС была исключительно тяжелой для сельского хозяйства. Регион аварии относится к зоне, где сельскохозяйственный сектор является одним из основных в экономике. Плотность радиоактивного загрязнения на значительных территориях оказалась достаточно высокой, чтобы затруднить производство и использование получаемой на них сельскохозяйственной продукции [1–7]. В составе радиоактивных веществ, поступивших в результате аварии в окружающую среду, присутствовали биологически подвижные ^{90}Sr , ^{131}I и ^{137}Cs , которые интенсивно мигрируют по цепи: почва – растения – животные и накапливаются в сельскохозяйственной продукции [1]. За исключением 30-км зоны ЧАЭС и нескольких прилегающих районов Беларуси и Украины, в которых вклад ^{90}Sr в загрязнение сельскохозяйственной продукции был значим, долгосрочные последствия Чернобыльской аварии для сферы сельскохозяйственного производства определялись ^{137}Cs [7–9]. При этом важную роль в формировании дозовых нагрузок на население в большинстве случаев играли и играют продукты животного происхождения и, в первую очередь, молоко [7, 10–12]. Это предопределило особое внимание изучению динамики содержания ^{137}Cs в молоке и молочных продуктах [9–12].

Для оценки радиологической ситуации в сфере агропромышленного производства и планирования защитных и реабилитационных мероприятий в регионах, подвергшихся

загрязнению, был организован радиационный мониторинг сельскохозяйственной продукции [14–19]. Система мониторинга в сельском хозяйстве включала Центр агрохимрадиологии «Брянский», Ветеринарный радиологический центр Брянской области, а также районные ветеринарные и агрохимические лаборатории [14]. Особенно интенсивно мониторинг проводился в шести юго-западных районах Брянской области и трех южных районах Калужской области, что позволило получить уникальные данные по поведению ^{137}Cs в окружающей среде и поступлению его в молоко после аварии на Чернобыльской АЭС [9, 15–18]. Проведение мониторинга в сфере сельского хозяйства в течение 35 лет после Чернобыльской аварии сыграло определяющую роль в выявлении сельскохозяйственной продукции, не соответствующей допустимым уровням, обеспечило эффективное планирование защитных и реабилитационных мероприятий в сфере агропромышленного комплекса (АПК), а также позволило обосновать нормативы допустимых уровней содержания ^{137}Cs в сельскохозяйственной продукции в различные периоды времени после аварии [18, 19]. Анализ динамики содержания ^{137}Cs в молоке с 1986 по 1992 годы представлен в наших ранних публикациях [8–11, 16, 19, 20], однако данные за последующий период практических не обобщались. Это ограничивает использование результатов мониторинга, проводимого организациями Минсельхоза России, для решения задач, связанных с обоснованием перехода населения, проживающего на загрязненных территориях, к условиям нормальной жизнедея-

Фесенко Сергей Викторович

Всероссийский научно-исследовательский институт радиологии и агроэкологии Национального исследовательского центра «Курчатовский институт»

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

тельности и оценки последствий других потенциально возможных аварий [21].

В первых двух публикациях этого цикла [23, 24] представлены данные по динамике содержания ^{137}Cs в продукции растениеводства и кормах сельскохозяйственных животных, получаемых на протяжении 35 лет после Чернобыльской аварии, в то время как настоящая статья описывает динамику содержания ^{137}Cs в молоке. Данные по концентрациям ^{137}Cs в мясе животных после аварии на Чернобыльской АЭС будут представлены в последней публикации этого цикла. Для облегчения сравнения закономерностей изменения содержания ^{137}Cs в различных видах сельскохозяйственной продукции все статьи, посвященные этой теме, имеют близкую структуру и аналогичное представление полученных результатов.

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

Задачи исследования

1. Обобщение данных по содержанию ^{137}Cs в молоке сельскохозяйственных животных, полученных организациями Минсельхоза России и ВНИИРАЭ после аварии на Чернобыльской АЭС.
2. Определение периодов полуснижения содержания ^{137}Cs в молоке крупного рогатого скота в различные временные интервалы после аварии.
3. Оценка роли факторов, определяющих динамику снижения содержания ^{137}Cs в молоке на протяжении 35 лет после аварии на Чернобыльской АЭС.

Исходные данные

Для анализа закономерностей изменения содержания ^{137}Cs в молоке использовались данные радиоэкологического мониторинга, организованного Ветеринарным радиологическим центром Брянской области и его лабораторными

подразделениями в 6 юго-западных районах Брянской области: Гордеевском, Злынковском, Климовском, Клиновском, Красногорском и Новозыбковском [1, 10, 18–20]. Динамика объемов проведения мониторинга молока и кормов сельскохозяйственных животных (по данным работы [24]) показана на рис. 1, а общее число отобранных проб и характеристики загрязнённых районов приведена в таблице 1. В 1986–1989 гг. мониторинг загрязнения молока проводился главным образом в общественном секторе, при этом отбор проб организациями ветеринарной службы носил ограниченный характер. В первую очередь это было связано с недостаточным обеспечением этих служб средствами, обеспечивающими достаточную точность измерений. Однако, уже в 1991 году Минсельхозом РФ были проведены закупки современного на тот момент оборудования, и существенно увеличено число проб молока и мяса сельскохозяйственных животных.

Начиная с 1991 года, мониторинг загрязнения продукции животноводства и кормов для животных охватывал все общественные хозяйства наиболее загрязненных юго-западных районов Брянской области, и молоко, получаемое в частном секторе этих районов (таблица 1). В период с 1992 по 2012 год объемы исследований проб молока, мяса и кормов для животных на территории Брянской области были максимальными. В несколько меньших масштабах этот мониторинг проводился в Калужской, Орловской и Тульской областях.

Увеличение интенсивности мониторинга загрязнения молока в 2000–2007 годах было связано и с принятием национальных программ Российской Федерации по преодолению последствий радиационных аварий [2]. Начиная с 2008 года, объемы отбора проб молока уменьшились и в 2015 после расформирования служб, осуществляющих ветеринарный радиологический надзор продукции животноводства, мониторинг молока, проводимый службами Минсельхоза, был сильно сокращен, а проводимый в этот период отбор проб не носил систематический характер.

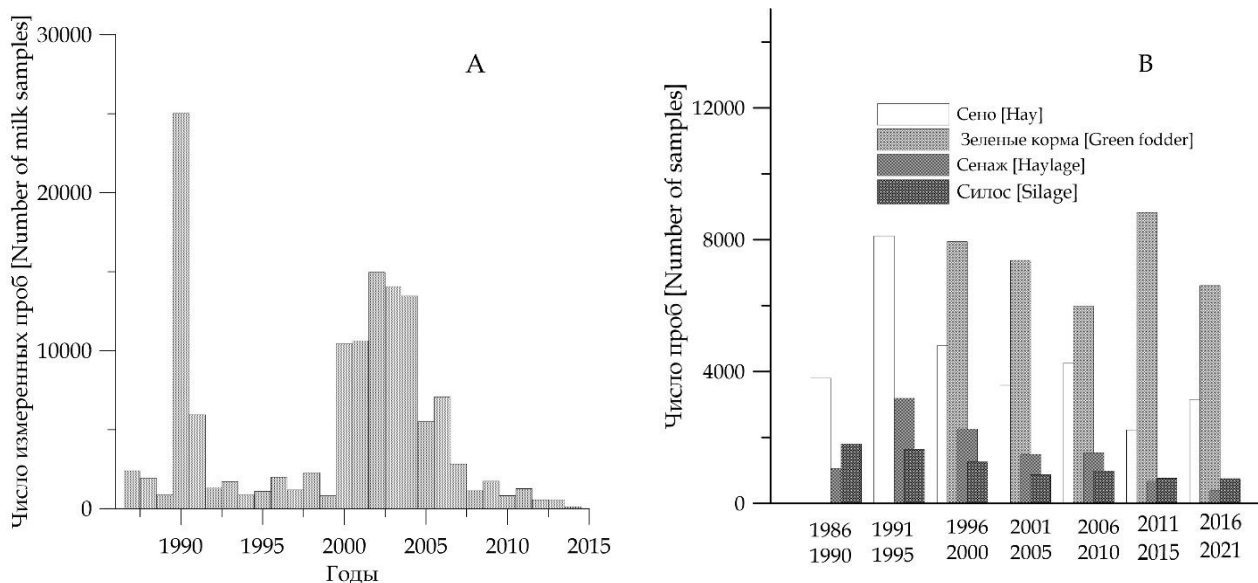


Рис. 1. Объемы отбора проб молока (А) и кормов сельскохозяйственных животных (В) в юго-западных районах Брянской области в 1986–2021 гг.

[Fig. 1. Quantity of milk (A) and feeds (B) samples taken in southwestern districts of Bryansk region in 1986–2021]

Таблица 1

Характеристики загрязненных районов и количество данных, использованных для анализа

[Table 1]

Characteristics of contaminated areas and quantity of data used for evaluations

Районы [Districts]	Плотность загрязнения ^{137}Cs ¹ , кБк/м ² [Contamination density ¹ , kBq/m ²]			Период проведения [Period of sampling]		Число проб молока [Number of milk samples]	
	Сенокосы [Haylands]	Пастбища [Pastures]	Пашня [Arable lands]	Общественное [Collective]	Частное [Private]	Общественное [Collective]	Частное [Private]
Гордеевский [Gordeevsky]	546 (409) ²	601 (421)	366 (210)	2000–2014	1990–2014	15806	36786
Злынковский [Zlunkovsky]	745 (544)	589 (486)	361 (333)	2000–2014	2000–2011	4639	30695
Климовский [Klimovsky]	259 (188)	273 (188)	156 (93)	2000–2006	2000–2007	1716	2727
Клинцовский [Klintsovsky]	393 (431)	442 (455)	232 (179)	2000–2014	2000–2009	14578	16546
Красногорский [Krasnogorsky]	590 (586)	525 (655)	320 (313)	1990–2011	1990–2011	20630	41675
Новозыбковский [Novozybkovsky]	1011 (646)	884 (596)	526 (318)	2000–2014	1990–2014	47936	41947
Всего [Total]	–	–	–	–	–	201418	201418

¹Плотность загрязнения ^{137}Cs дана на май 1986 года [¹ Contamination density by ^{137}Cs is given for May 1986].²В скобках дано среднее квадратичное отклонение [² The standard deviations are given in the brackets.]

Наиболее интенсивно мониторинг проводился в хозяйствах и населенных пунктах юго-западных районов Брянской области, в которых отмечались высокие плотности загрязнения ^{137}Cs сенокосов и пастбищ. Данные, приведенные в таблице 1, отражают результаты отбора проб молока, проведенного в 177 хозяйствах с плотностью загрязнения кормовых угодий ^{137}Cs от 17 до 3800 кБк/м². Из них в 55 хозяйствах плотность загрязнения сенокосов в 1986 год была меньше 185 кБк/м², в 46 плотность загрязнения сенокосов превышала 555 кБк/м². В 76 хозяйствах плотность загрязнения была в диапазоне между 185 и 555 кБк/м². Значительная доля измерений (около 90 тысяч) относится к Новозыбковскому району.

После аварии на Чернобыльской АЭС были введены нормативы, определяющие возможность использования загрязненных продуктов питания, включая молоко. Эти нормативы использовались как индикаторы «загрязненной» продукции и устанавливались исходя не только на основе общих радиологических критериев, но и на основе экономических условий и возможности достижения этих нормативов в послеаварийный период. По мере улучшения радиационной обстановки значения ВДУ для $^{134,137}\text{Cs}$ и ^{90}Sr в продуктах питания пересматривались в сторону уменьшения [20]. После аварии на Чернобыльской АЭС также были введены контрольные уровни (K_c) содержания ^{137}Cs в кормах, которые устанавливались таким образом, чтобы гарантировать отсутствие превышения допустимых уровней содержания радионуклидов в пищевых продуктах, и мотивировать снижение содержания ^{137}Cs в продукции до реально достижимого низкого уровня [21, 24].

При анализе закономерностей динамики содержания радионуклидов в молоке необходимо учитывать влияние мероприятий, проводимых в загрязненных районах, включая коренное и поверхностное улучшение лугов и пастбищ и применение ферроцинсодержащих препаратов.

В первый период после аварии на Чернобыльской АЭС культуртехнические мероприятия проводились на больших площадях [24]. В последствии, вследствие экономических проблем, объемы проведения культуртехнических мероприятий снизились, что привело к увеличению объемов загрязнения продукции. Наиболее значительные объемы проведения культуртехнических мероприятий отмечались в первые 5–7 лет после аварии, и к 1991 года практически все доступные кормовые угодья в юго-западных районах Брянской области были охвачены этими мероприятиями [24]. В 1996–2000 гг. проведение этих мероприятий было минимальным и не соответствовало потребности в окультуривании сельскохозяйственных угодий. В 2000–2013 годах в рамках федеральных целевых программ работы по реабилитации загрязненных территорий эти мероприятия проводились в достаточно больших объемах, что определило снижение загрязнения продукции растениеводства и кормов для сельскохозяйственных животных. [23, 24]. Особенности проведения культуртехнических мероприятий в Брянской области и их влияние на поступление ^{137}Cs в корма сельскохозяйственных животных детально рассмотрены в публикации [24].

Начиная с 1993 года было начато активное применение ферроцинсодержащих препаратов (ФСР), что позволило в значительной степени компенсировать уменьшение интенсивности проведения реабилитационных мероприятий в кормопроизводстве (рис. 2). ФСР в достаточно больших объемах применялись в период уменьшения объемов проведения культуртехнических мероприятий, что позволило в значительной степени избежать существенного увеличения загрязнения молока, производимого в юго-западных районах Брянской области.

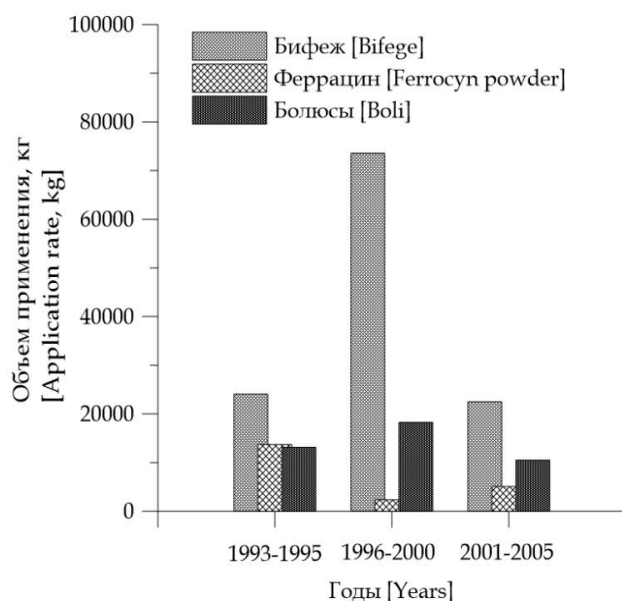


Рис. 2. Применения ферроцинсодержащих препаратов в Брянской области [25]
[Fig. 2. Administration of hexacyanoferrate compounds in Bryansk region [25]]

Анализ данных

Для обработки данных использовался подход, предложенный в работе [26]. Для каждой выборки применялся критерий отбраковки выбросов, при этом для малых выборок (менее 25 значений) применяли критерий Диксона, а к большим – применяли стандартные статистические критерии. После отбраковки недостоверных данных определяли параметры распределения. Периоды полуснижения рас-

считывали с помощью стандартных методов линейной регрессии [26].

Влияние состава рациона на динамику содержания ^{137}Cs в молоке

Содержание радионуклидов в молоке определяется суточным поступлением радионуклидов в организм коров, которое зависит от концентраций радионуклидов в кормах, потребляемых животными и рационов кормления, которые сбалансированы по содержанию сухого вещества, питательных веществ и микроэлементов [15, 27]. Основные типы рационов кормления животных, используемые в юго-западных районах Брянской области, приведены в таблице 2. Эти рационы включали 5 основных компонентов: злаковое сено, кукурузный силос, сенаж и концентрированные корма. Для кормления животных также используются кормовая свекла, солома и свекловичный жом.

В пастбищный период рацион состоит из зеленых кормов с добавкой концентратов. К числу основных компонентов рациона в стойловый период относятся злаковое сено, кукурузный силос и сенаж, потребление которых определяет поступление радионуклидов в организм животного, а также концентраты. Для кормления животных может использоваться кормовая свекла и свекловичный жом, однако их вклад в поступление ^{137}Cs в молоко не значителен [21].

Пастбищный период (травяной рацион) в юго-западных районах Брянской области обычно начинается 26 апреля и длится 182 дня, при этом, на основе данных многолетних наблюдений, принималось, что 60% молока производится в пастбищный период и 40% в стойловый.

В случае равномерного загрязнения территории загрязнение молока в период содержания животных на силосном рационе (при прочих равных условиях) примерно в 2 раза меньше, чем в пастбищный период, то есть в период

Таблица 2

Типовые рационы кормления молочного скота, кг/сутки

[Table 2]

Компоненты рациона [Ration components]	Рационы кормления молочных коров [Feed rations for dairy cows]			
	Травяной [Herbal]	Силосно-сенажный [Silage-Hay]	Смешанный [Mixed]	Силосный [Silage]
Стойловый период [Stall period]				
Злаковое сено [Cereal hay]	–	8	5	8
Кукурузный силос [Maize silage]	–	15	22	25
Сенаж [Haylage]	–	5	13	–
Солома [Straw]	–	3	3	–
		2		
Концентраты [Concentrate feed]	5	2,5	2,5	2
Пастбищный период [Grazing period]				
Зеленые корма [Green fodder]	40	–	–	–

применения травяного рациона. При смешанном рационе эти различия составляют 1,8 раза, а максимальные различия между загрязнением молока в стойловый и пастбищный периоды могут отмечаться при включении в состав «зимнего» рациона корнеплодов [21]. Это позволяет рассматривать варьирование составом рациона как одно из ветеринарных мероприятий, направленных на снижение загрязнения продукции животноводства [15]. Для производства кормов в юго-западных районах Брянской области использовались сельскохозяйственные угодья, отличающиеся по характеристикам почвы, плотности загрязнения и степени окультуривания. Важным фактором, влияющим на поступление радионуклидов в корма и, как следствие, в организм животного, были и защитные мероприятия в АПК.

Содержание ^{137}Cs в суточном стандартном рационе кормления животных (j) при известной концентрации радионуклидов в кормах рассчитывается на основе стандартного выражения:

$$Q^j(t) = \sum_i^N \delta_i^j \times q_i(t) \quad (1)$$

где: δ_i^j - весовое количество кормов вида (i) в суточном рационе кормления животных (j); $q_i(t)$ концентрация ^{137}Cs в i -м виде кормов. В этом случае содержание ^{137}Cs в молоке, соответствующее рациону j , можно оценить с помощью коэффициента перехода из суточного поступления в организм животного в молоко (K_{π}^j).

$$C^j = K_{\pi}^j \times Q^j \quad (2)$$

Результаты расчетов содержания ^{137}Cs в молоке при использовании рационов, приведенных в таблице 2 на протяжении 35 лет после Чернобыльской аварии на основе выражений (1) и (2), приведены на рис. 3.

Значение K_{π}^j , равное $9,2 \times 10^{-3}$ (Бк/кг)/(Бк/сутки), соответствует оценке геометрического среднего на основе данных, полученных в этом регионе после аварии на ЧАЭС [21], а содержание ^{137}Cs в кормах – на основе информации по динамике загрязнения кормов в этот период [24].

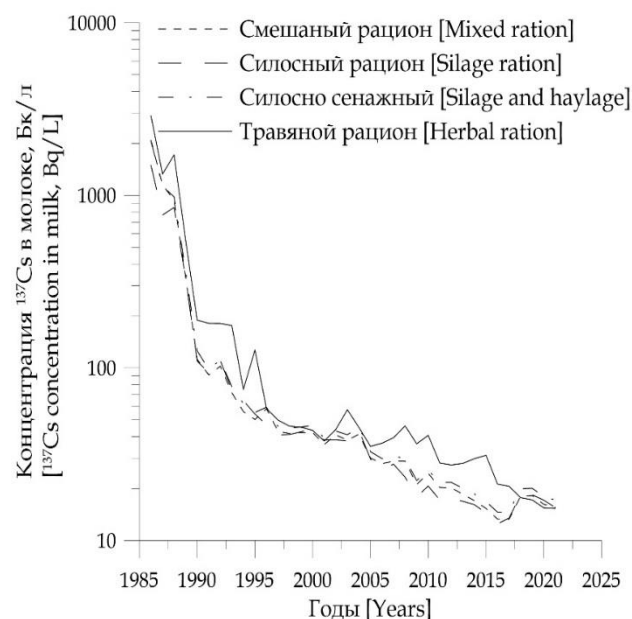


Рис. 3. Динамика содержания ^{137}Cs в молоке для различных рационов животных

[Fig. 3. Dynamics of ^{137}Cs concentrations in milk corresponding different feeding rations]

Данные, представленные на рис. 3 и 4, показывают влияние рационов, используемых для кормления животных, на поступление ^{137}Cs в молоко. При этом динамика содержания ^{137}Cs в молоке, рассчитанного для рационов в стойловый период (рис. 3), значительно отличалась от динамики ^{137}Cs в молоке в пастбищный период (травяной рацион). В то же время различия между содержанием ^{137}Cs в молоке, рассчитанном для различных рационов стойлового периода, отличались менее значительно.

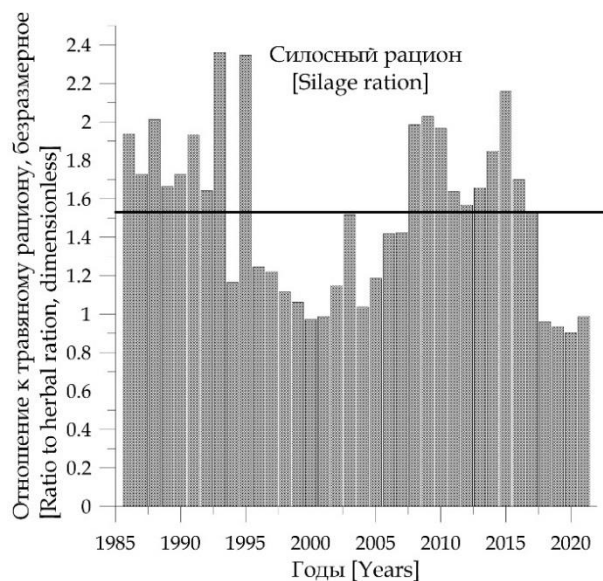
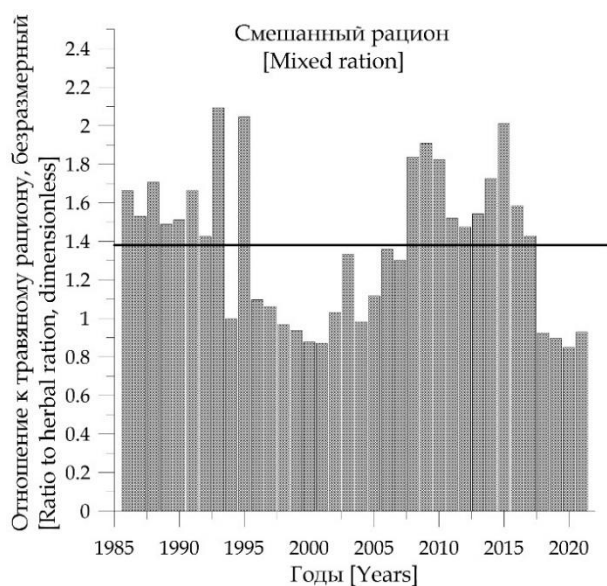


Рис. 4. Динамика отношений концентраций ^{137}Cs в молоке в стойловый период к молоку, производимому в пастбищный период (травяной рацион)

[Fig. 4. Dynamics of the ratios of the ^{137}Cs concentrations in the milk of winter period to those in the milk of the pasture period (herbal ration)]

Динамика содержания ^{137}Cs в кормах, производимых в юго-западных районах Брянской области в различные периоды после аварии на Чернобыльской АЭС, отличалась [24]. Вследствие экономических и технических условий организации кормопроизводства на загрязненных территориях состав кормов в рационе кормления животных также варьировал. Вследствие этого отношение между уровнями загрязнения молока в стойловый и пастбищный периоды также варьировало и отклонялось от отношения в случае, когда уровни загрязнения сельскохозяйственных угодий были близки.

На рис. 4 показана динамика расчётных отношений концентраций ^{137}Cs в молоке крупного рогатого скота в период стойлового содержания для смешанного и силосного рационов к концентрациям ^{137}Cs в молоке при содержании животных на травяном рационе.

Сплошная линия на рис. 4. показывает среднее значение за 35 лет, прошедших после аварии. Оценки, сделанные на основе выражений (1) – (2) и данных работы [24] по содержанию ^{137}Cs в кормах, показывают, что реальное отношение загрязнения молока в пастбищный период к загрязнению молока в стойловый период, учитывающее различия в загрязнении сельскохозяйственных угодий, проведение мероприятий и смену полей в рамках севооборота, для смешанного рациона находилось в диапазоне от 0,85 до 2,1 при среднем 1,48. Для силосного рациона эти значения составляли 0,9 и 2,4 при среднем 1,53.

Динамика концентрации ^{137}Cs в молоке в первый период после аварии

Данные по концентрациям ^{137}Cs в молоке в 1986–1991 годах, полученные при проведении мониторинга, приведены на рис. 5.

В первый период после аварии на Чернобыльской АЭС мониторинг продукции животноводства проводился на ограниченном числе хозяйств научными организациями и, в первую очередь, ВНИИРАЭ. Впоследствии эти данные

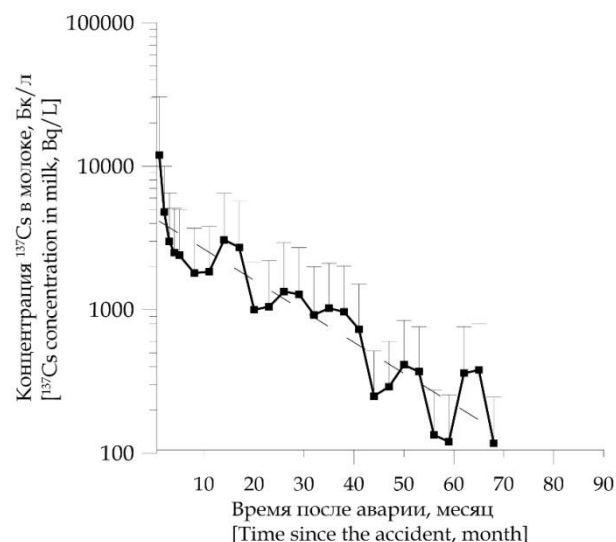


Рис. 5. Динамика концентраций ^{137}Cs в молоке крупного рогатого скота в первый период после Чернобыльской аварии, тренд показан пунктиром [27]

[Fig. 5. Dynamics of ^{137}Cs concentrations in cattle milk in the first period after the Chernobyl accident, the exponential trend is shown by the dotted line [27]]

были обобщены и использовались для валидации биосферных моделей [27]. В 1986 году, в первый период после выпадений (май – август 1986 г.), усредненные по месяцам концентрации ^{137}Cs в молоке уменьшались с периодом полуснижения примерно 30 дней. Эта оценка периода полуснижения существенно больше периодов, рассчитываемых на основе детальной посуточной динамики самоочищения растительности и снижения концентрации ^{137}Cs в молоке [28]. При переходе на стойловый рацион в 1986 г. отмечалась стабилизация концентраций радионуклида в молоке с последующим ростом концентраций в молоке в следующий пастбищный период. Период полуснижения средних по году концентраций ^{137}Cs в молоке составил для 1986–1991 гг. 0,6 лет ($R^2=0,84$).

Динамика среднегодовых уровней содержания ^{137}Cs в молоке: 1987–2014 годы

Мониторинг содержания радионуклидов в продукции животноводства проводился с 1987 до 2014 г. Концентрации ^{137}Cs в молоке, получаемом в общественном и частном секторе в этот период приведены на рис. 6. На этом рисунке наряду с данными измерений содержания ^{137}Cs в молоке приведены и результаты реконструкции загрязнения молока на основе рационов и концентраций ^{137}Cs в кормах [23–24]. Результаты оценок концентраций ^{137}Cs в молоке на основе загрязнения рациона в периоды времени, когда не применялись ФСП, в частности с 1987 до 1992 гг., и с 2009 до 2014 гг. довольно хорошо соответствуют данным измерений ^{137}Cs в молоке. В периоды времени, когда ферроцинсодержащие препараты использовались широко, содержание ^{137}Cs в молоке было, как правило, ниже данных, которые получены на основе содержания ^{137}Cs в рационе. В Новозыбковском районе, в котором эти препараты применялись с 1993 по 2009 год, данные измерений содержания ^{137}Cs в молоке систематически превышали оценки, полученные на основе рационов кормления животных. В Климовском районе, в котором ферроцинсодержащие препараты не применялись, средние уровни содержания ^{137}Cs в молоке уже после 1990 года были ниже 100 Бк/л. Ферроцинсодержащие препараты в этом районе не применялись, и расчетные и измеренные концентрации ^{137}Cs в молоке были довольно близки.

Можно выделить три периода времени, в течение которых динамика снижения ^{137}Cs в молоке отличалась. Первый период с 1987 до 1992 года, второй – 1993 по 2000 г. и третий с 2000 по 2014 г. В соответствии с этим были рассчитаны периоды полуснижения концентраций ^{137}Cs в молоке $T_{1/2}^1$, $T_{1/2}^2$ и $T_{1/2}^3$ (таблица 3). Интервал времени, в течение которого проводился отбор проб в Климовском районе, был короче, чем в других районах и ограничивался 2007 г.

Первый период охватывал промежуток времени, когда мероприятия применялись в максимальных масштабах. Динамика снижения содержания ^{137}Cs в этот период определялась агротехническими и агрохимическими мероприятиями, а оценка загрязнения молока на основе рациона кормления животных была близка к данным измерений. Периоды полуснижения содержания ^{137}Cs в молоке (от 1 до 2 лет), были несколько короче периодов полуснижения содержания ^{137}Cs в кормах, что объясняется проведением ветеринарных мероприятий в первый период после аварии на Чернобыльской АЭС. Второй период включает промежуток времени, когда объемы проведения защитных меро-

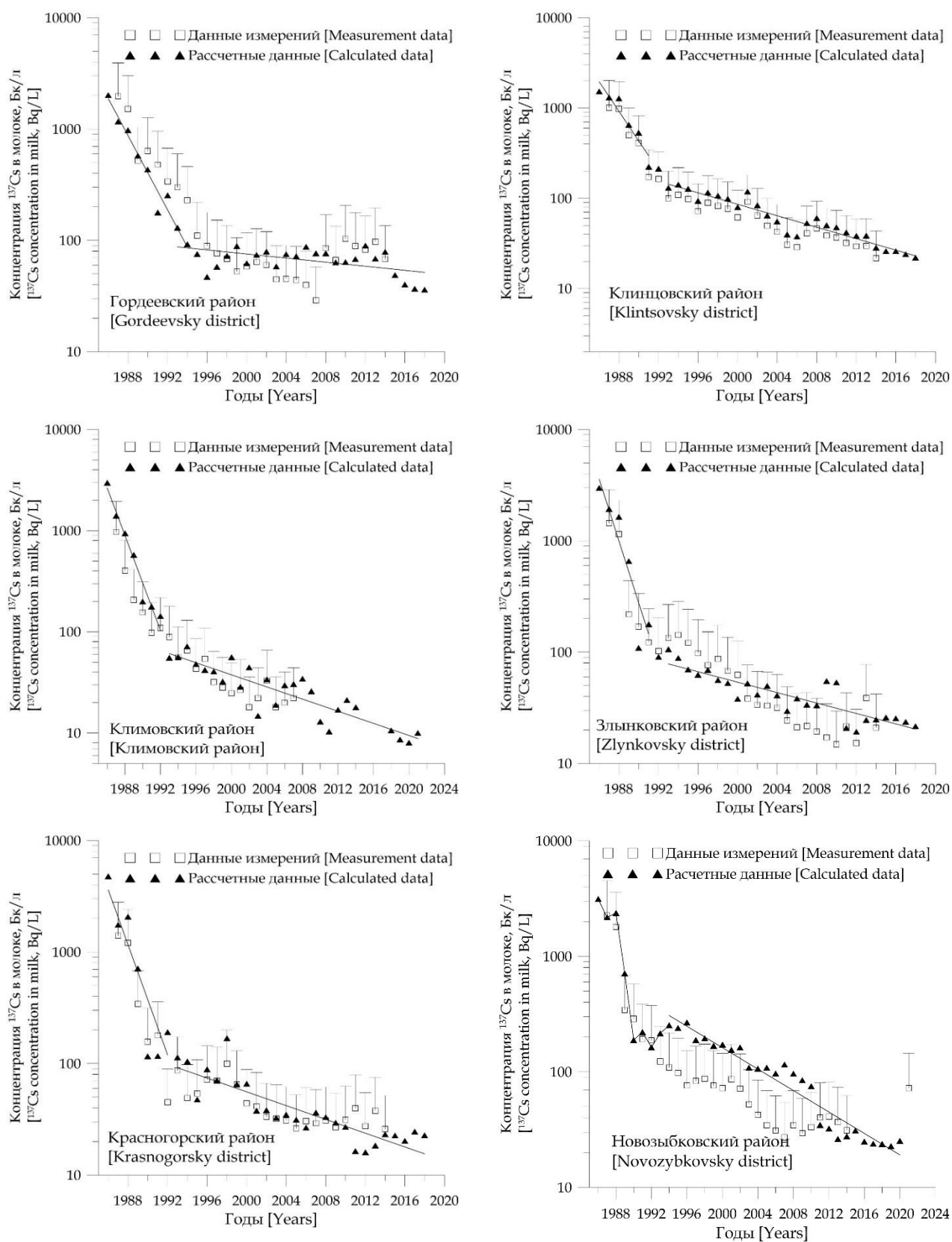


Рис. 6. Содержание ^{137}Cs в молоке в юго-западных районах Брянской области
[Fig 6. ^{137}Cs concentrations in milk in southwestern districts of Bryansk region]

Таблица 3

Эффективные периоды полуснижения содержания ^{137}Cs в пробах молока, отобранных в юго-западных районах Брянской области в 1987–2014 годах

[Table 3]

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

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
Гордеевский [Gordeevsky]	2,0	0,92	2,4	0,94	21	0,31
Злынковский [Zlunkovsky]	1,2	0,91	12	0,82	12	0,59
Климовский [Klimovsky]	1,5	0,92	4,1	0,89	23,1	0,14
Клинцовский [Klintsovsky]	1,6	0,92	9,9	0,88	10,5	0,71
Красногорский [Krasnogorsky]	1,0	0,88	24,0	0,05	25,0	0,42
Новозыбковский [Novozybkovsky]	1,4	0,90	6,4	0,77	11,6	0,66

приятый агротехнических мероприятий сократились, а довольно низкие уровни загрязнения молока поддерживались за счет применения ферроцинсодержащих препаратов. Для этого периода оценки загрязнения молока на основе рациона кормления животных были ниже данных измерений. С 2000 г. начался третий период – период активного внедрения федеральных целевых программ и последствий от применения агротехнических реабилитационных мероприятий.

В районах с наибольшими уровнями загрязнения молока отмечены как более короткие периоды полуснижения, так и максимальные отличия измеренных уровней загрязнения молока от уровней загрязнения, оцененных на основе данных о загрязнении кормов. Периоды полуснижения с 1993 по 2000 гг. варьировали в широком диапазоне от 2,4 до 24 лет, а третьи от 10,5 года до более 25 лет. Средние по юго-западным районам периоды полуснижения составили 1,4, 9,8 и 17,2 года.

Динамика загрязнения молока в частном и коллективном секторе

При планировании защитных и реабилитационных мероприятий на загрязненных территориях изначально предполагалось, что содержание ^{137}Cs в «частном» молоке выше, чем в молоке, производимом в коллективном секторе. Во многих случаях это связано с тем, что корма для частных животных производились на угодьях более низкого качества. Данные, полученные в наших исследованиях, подтверждают это предположение (рис. 7). Превышение концентраций ^{137}Cs в молоке, получаемом в частном секторе над содержанием радионуклида в «общественном» молоке, носило систематический характер, хотя и было относительно невелико: от 20 до 80%. Среднее отношения концентраций ^{137}Cs в «частном» молоке к «коллективному» составило $1,3 \pm 0,25$. Периоды полуснижения ^{137}Cs в молоке, производимом в частном и коллективном секторах, были близки и составили для периода 1990–2000 гг. 8,0 и 8,3 года, а для 2000–2014 гг. – 21 и 27 лет. Это показывает, что мероприятия, проводимые в частных и общественных хозяйствах, имели близкую эффективность.

Сравнение с данными других исследований

Полученные данные в целом находятся в согласии с данными других исследований (таблица 4), существенно их дополняя. Ряды данных, полученных в Российской

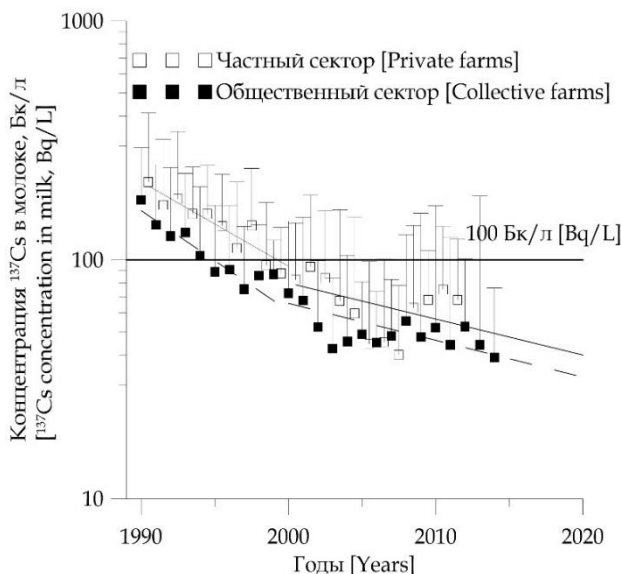


Рис. 7. Динамика концентраций ^{137}Cs в молоке, производимом в частных и коллективных хозяйствах юго-западных районов Брянской области
[Fig. 7. Dynamics of ^{137}Cs concentrations in milk produced in private and collective farms in the southwestern districts of Bryansk region]

Федерации, существенно длиннее периодов и объемов мониторинга в других странах.

В работе [32] представлен обзор данных по снижению содержания ^{137}Cs в молоке в районах Дании, Германии и Австрии, которые охватывают период времени, начиная с 1965 года. В то же время эти данные не позволяют в полной мере провести прямое сравнение с нашими оценками, поскольку первые годы после выпадений из оценки периодов полуснижения были исключены.

Периоды полуснижения с 1989 до 1999 гг. в регионах Европы, где вклад чернобыльской компоненты был значителен, находятся в диапазоне от 5,2 до 9,5 лет и достаточно хорошо согласуются с данными, приведёнными в настоящей статье для аналогичного периода.

В Австрии на основе данных мониторинга с 1987 по 1993 гг., был оценен период полуснижения для молока рав-

Таблица 4

Периоды полуснижения содержания ^{137}Cs в молоке (литературные данные)

[Table 4]

Half-lives of ^{137}Cs in milk (based on literature data)							
Место отбора [Sampling region]	Годы [Years]	$T_{1/2}^1$, лет [years]	R^2	Годы [Years]	$T_{1/2}^2$, лет [years]	R^2	Ссылки [ref.]
Брянская область [Bryansk region]	1987–1990	0,8–1,3	0,89	1990–1992	2,6–4,3	0,54	[13]
Калужская область [Kaluga region]	1987–1990	1,1–1,8	–	1990–1992	5,7–11,7	–	[13]
Тульская, Орловская [Tula/Orel region]	1987–1990	2,1–2,4	0,66	–	–	–	[31]
Австрия [Austria]	1987–1993	1,4±0,3	–	–	–	–	[32]
Бавария [Bavaria]	1969–1985	4,5	90,5	1989–1999	5,9	95,3	[32]
Баден–Вюртенберг [Baden-Württemberg]	1969–1985	3,2	86,1	1989–1999	9,1	90,6	[32]
Северный Рейн Вестфалия [North Rhine Westphalia]	1969–1985	7,2	91,7	1989–1999	9,5	85,5	[32]
Нижняя Саксония [Lower Saxony]	1969–1985	6,1	91,5	1989–1999	5,2	83,4	[32]
Дания [Denmark]	1967–1985	6,9	–	–	–	–	[32]

ный $1,94 \pm 0,32$ года [33], что входит в диапазон оценок, полученных для районов Российской Федерации. В этих работах также отмечено, что экологические периоды полуснижения радиоцезия в молоке варьировали в зависимости от 1 до 4 лет в первые 5–6 лет после выпадения, после чего наступило более медленное снижение с экологическим периодом полуснижения между 5 и 15 годами [33]. Аналогичные выводы сделаны в работе [34], в которой также отмечено увеличение экологического периода полуснижения ^{137}Cs в молоке от около 1,0 года течение первых лет после Чернобыльской аварии до 20–30 лет в последующие годы.

Периоды полуснижения, рассчитанные для 2000–2008 гг., варьируют от 10,5 до 25 лет при среднем значении 17,4 года. Учитывая хорошее согласие между оценками, полученными на основе измерений и расчетов, сделанных с помощью данных о содержании ^{137}Cs в кормах (периоды полуснижения для 2015–2021 гг. находятся в диапазоне 18–27 лет), можно сделать вывод о том, что оценка, близкая к верхнему пределу варьирования этого параметра может консервативно использоваться для анализа возможности перехода загрязненных районов к условиям нормальной жизнедеятельности.

Заключение

Анализ данных по закономерностям изменения содержания ^{137}Cs в молоке, производимом в юго-западных районах Брянской области, подтверждает выводы, сделанные при изучении закономерностей накопления этого радионуклида в продукции растениеводства и кормопроизводства, представленные в наших предыдущих публикациях [23, 24]. Динамика содержания радиоцезия в молоке после аварии на Чернобыльской АЭС во многом зависела от осо-

бенностей проведения агротехнических и агрохимических реабилитационных мероприятий, включая применение ферроцинсодержащих препаратов и достаточно хорошо согласуется с данными по содержанию этого радионуклида в кормах. Первые периоды полуснижения с 1987 по 1993 годы находились в диапазоне от 1 до 2 лет, вторые периоды от 4,4 до 24 лет и третьи от 10,5 до 25 лет. Периоды полуснижения, рассчитанные для сельскохозяйственных предприятий различных районов отличались, что необходимо учитывать при определении стратегии перехода этих районов к нормальным условиям жизнедеятельности.

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.

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

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

Карпенко Е.И. — анализ и интерпретация данных; согласие нести ответственность за все аспекты статьи, обеспечивая решение вопросов, связанных с точностью или целостностью любой части работы.

Горяинов В.А. – сбор и интерпретация данных; согласие нести ответственность за все аспекты статьи, обеспечивая решение вопросов, связанных с точностью или целостностью любой части работы.

Благодарности

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 биотехнологические исследования для сельского хозяйства»). Авторы выражают свою признательность рецензентам за тщательное прочтение рукописи и ценные замечания.

Информация о конфликте интересов

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

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.
2. Финогенов А.А., Ткачев В.А., Локшин А.М. и др. Российский Национальный Доклад: 35 лет чернобыльской аварии. итоги и перспективы преодоления ее последствий в России. 1986–2021. М.: ИБРАЭ, 2021. 116 с.
3. Алексахин Р.М., Крышев И.И., Санжарова Н.И. и др. Радиоэкологические последствия Чернобыльской аварии: Монография / под ред. Крышева И.И. ЯО СССР, сер. Радиоэкологические аспекты ядерной энергетики. М.: 1991. 190 с.
4. Алексахин Р.М., Козьмин Г.В., Санжарова Н.И., Фесенко С.В. О реабилитации территорий, подвергшихся загрязнению // Вестник РАСХН. 1994. № 2. С. 28–30.
5. Алексахин Р.М., Корнеев Н.А., Гераськин С.А. и др. Итоги исследований по радиобиологии и радиоэкологии во Всероссийском научно-исследовательском институте сельскохозяйственной радиологии и агроэкологии // Радиационная биология. Радиоэкология. 1998. Т. 38, № 2. С. 293–302.
6. Алексахин Р.М., Крышев И.И., Фесенко С.В., Санжарова Н.И. Радиоэкологические проблемы ядерной энергетики // Атомная энергия. 1990. Т. 68, № 6. С. 320–328.
7. 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.
8. Санжарова Н.И., Фесенко С.В., Алексахин Р.М. и др. Оценка факторов, определяющих динамику загрязнения ^{137}Cs сельскохозяйственной продукции после аварии на Чернобыльской АЭС // Радиационная биология. Радиоэкология. 1995. Т. 35, № 3. С. 307–315.
9. Фесенко С.В., Алексахин Р.М., Спиридонов С.И. и др. Закономерности изменения содержания ^{137}Cs в продукции животноводства на территории Российской Федерации, подвергшейся загрязнению в результате аварии на Чернобыльской АЭС // Радиационная биология. Радиоэкология. 1995. Т. 35, № 3. С. 316–326.
10. 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.
11. 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.
12. Alexakhin R.M., Fesenko S.V., Sanzharova N.I. Serious radiation accidents and the radiological impact on agriculture // Radiation Protection Dosimetry. 1996. Vol. 64. P. 37–42.
13. Fesenko S.V., Alexakhin R.M., Sanzharova N.I. et al. 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. Vol. 60(2). P. 155–166.
14. 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(5). P. 418–426.
15. Исамов Н.Н. (мл.), Сироткин А.Н., Фесенко С.В. и др. Закономерности миграции техногенных загрязнителей в трофической цепи лактирующих коров // Экология. 1998. № 6. С. 441–446.
16. Алексахин Р.М., Фесенко С.В., Санжарова Н.И. и др. О снижении содержания ^{137}Cs в продукции растениеводства, подвергшейся загрязнению после аварии на Чернобыльской АЭС // Доклады РАСХН. 1995. № 3. С. 20–21.
17. 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(12). P. 153–162.
18. Методы и средства радиационного контроля / Под ред. А.А. Курганова, В.Н. Мошарова. Министерство сельского хозяйства. М.: 1995. 178 с.
19. 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(1). P. 43–48.
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. Фесенко С.В., Исамов Н.Н., Прудников П.В., Емлютина Е.С. Радиоэкологическое обоснование контрольных уровней содержания ^{137}Cs в кормах сельскохозяйственных животных // Радиационная биология. Радиоэкология. 2021. Т. 61, № 6. С. 652–663.
22. 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.
23. 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.
24. Фесенко С.В., Прудников П.В., Исамов Н.Н. и др. 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.
25. Герасимова Н.В., Марченко Т.А., Онищенко Г.Г. и др. 20 лет Чернобыльской катастрофы. Итоги и проблемы ее преодоления в России. 1986–2006. Российский национальный доклад. М.: ИБРАЭ. 2006. 92 с.
26. 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.

27. Thiessen K.M., Sazykina T.G., Apostoei A.I. et al. Model testing using data on ^{137}Cs from Chernobyl fallout in the Iput River catchment area of Russia // Journal of Environmental Radioactivity. 2005. 84(2). P. 225–244.
28. Fesenko S., Shinano T., Onda Y., 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. 106347.
29. Fesenko S., Howard B.J., Isamov N. et al. Review of Russian language studies on radionuclide behaviour in agricultural animals: 2. Transfer to milk // Journal of Environmental Radioactivity. 2007. Vol. 98. P. 104–136.
30. 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. P. 020509.
31. Fesenko S.V., Colgan P.A., Lissianski K.B. et al. The dynamics of the transfer of caesium-137 to animal fodder in areas of Russia affected by the Chernobyl accident and doses resulting from the consumption of milk and milk products // Radiation Protection Dosimetry. 1997. 69 (4). P. 289–299.
32. Pröhl G., Ehken S., Fiedler I. et al. Ecological half-lives of ^{90}Sr and ^{137}Cs in terrestrial and aquatic ecosystems // Journal of Environmental Radioactivity. 2006. Vol. 91, No. 1–2. P. 41–72.
33. Muck K. Long-term effective decrease of caesium concentration in foodstuffs after nuclear fallout // Health Physics. 1997. Vol. 72. P. 659–673.
34. 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.

Поступила: 29.03.2024

Фесенко Сергей Викторович – главный научный сотрудник Всероссийского научно-исследовательского института радиологии и агроэкологии Национального исследовательского центра «Курчатовский институт». **Адрес для переписки:** 249032, Россия, Калужская область, Обнинск, Киевское шоссе, д. 1, корп. 1; E-mail: Corwin_17F@mail.ru

Исамов Низаметдин Низаметдинович – заведующий лабораторией Всероссийского научно-исследовательского института радиологии и агроэкологии Национального исследовательского центра «Курчатовский институт», Обнинск, Россия

Емлютина Евгения Сергеевна – научный сотрудник Всероссийского научно-исследовательского института радиологии и агроэкологии Национального исследовательского центра «Курчатовский институт», Обнинск, Россия

Карпенко Евгений Игоревич – директор Всероссийского научно-исследовательского института радиологии и агроэкологии Национального исследовательского центра «Курчатовский институт», Обнинск, Россия

Горяинов Вадим Анатольевич – заместитель директора департамента сельского хозяйства Брянской области, Брянск, Россия

Для цитирования: Фесенко С.В., Исамов Н.Н., Емлютина Е.С., Карпенко Е.И., Горяинов В.А. Динамика содержания ^{137}Cs в молоке сельскохозяйственных животных в районах Брянской области, пострадавших после аварии на ЧАЭС // Радиационная гигиена. 2024. Т. 17, № 3. С. 16–28. DOI: 10.21514/1998-426X-2024-17-3-16-28

Dynamics of ^{137}Cs concentrations in cow milk in the districts of Bryansk region

Sergey V. Fesenko¹, Nizametdin N. Isamov¹, Evgeniya S. Emlyutina¹, Evgeny I. Karpenko¹, Vadim A. Goryainov²

¹Russian Institute of Radiology and Agroecology of National Research Centre «Kurchatov Institute», Obninsk, Russia

²Bryansk Administration, Bryansk Region, Bryansk, Russia

The publication continues the series of research addressed to the dynamics of ^{137}Cs concentrations in agricultural products after the Chernobyl accident. The purpose of the present paper was to analyze the data describing the changes of ^{137}Cs concentrations in cow milk. The information on countermeasures in animal breeding is presented, the system of radiological monitoring of milk contamination is described. It is shown that the dynamics of ^{137}Cs concentrations in milk was seriously affected by the implementation of agrotechnical and veterinary measures. Effective half-lives of ^{137}Cs concentrations in milk in the first period after the accident (1987–1992) ranged from 1 to 2.0 years. In the subsequent period (1991–2015), the reduction of milk contamination slowed down and the half-lives ranged from 5 to 25 years depending on the scope of remediation works and ^{137}Cs aging in the soil.

Key words: Chernobyl NPP, agroindustrial production, milk of farm animals, southwestern districts of Bryansk region.

Sergey V. Fesenko

Russian Institute of Radiology and Agroecology of National Research Centre «Kurchatov Institute»

Address for correspondence: Kievskoye shosse, 1, bldg. 1, Kaluga Region, Obninsk, 249035, Russia; E-mail: Corwin_17F@mail.ru

Authors' personal 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.

Nizametdin 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.

Evgeny I. Karpenko – data analysis and interpretation; agree to be responsible for all aspects of the article, ensuring proper investigation and resolution of issues related to the accuracy or integrity of the work.

Vadim A. Goryainov - data collection and interpretation; agree to be responsible for all aspects of the article, ensuring proper investigation and resolution of issues related to the accuracy or integrity of the work.

Acknowledgments

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 (project 5P.7. "Applied genetic and biotechnological research for agriculture"). The authors also express their gratitude to the reviewers for careful reading of the manuscript and valuable comments.

Conflict of interests

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

References

1. Radioecological consequences of the Chernobyl accident: biological effects, migration, rehabilitation of contaminated areas: Monograph Edited by Sanzharova NI and Fesenko SV. Moscow: RAS; 2018. 278 p. Available from: <https://rirae.ru/index.php/deyatelnost/publikatsii-fgbnu-vniirae/444-osnovnye-nauchnye-publikatsii-sotrudnikov-fgbnu-vniirae-v-2018-g>. (Accessed: January 22, 2023) (In Russian).
2. Finogenov AA, Tkachev VA, Lokshin AM, Asmolov VG, Verpeta VI, Kuzmin SV, et al. Russian National Report: 35 years of the Chernobyl accident. results and prospects of overcoming its consequences in Russia. 1986–2021. Moscow: IBRAE; 2021. 116 p. (In Russian).
3. Alexakhin RM, Kryshev II, Sanzharova NI, Fesenko SV. Radioecological consequences of the Chernobyl accident. Moscow: NS of the USSR; 1991. 190 p. (In Russian).
4. Alexakhin RM, Kozmin GV, Sanzharova NI, Fesenko SV. On rehabilitation of territories subjected to contamination. *Vestnik RASKHN = Vestnik RASKHN*. 1994;2: 28–30. (In Russian).
5. Alexakhin RM, Korneev NA, Geraskin SA, Sanzharova NI, Fesenko SV, Panov AV, et al. Results of research on radiobiology and radioecology at the All-Russian Research Institute of Agricultural Radiology and Agroecology. *Radiatsionnaya biologiya. Radioekologiya = Radiation Biology. Radioecology*. 1998;38(2): 293–302. (In Russian).
6. Alexakhin RM, Kryshev II, Fesenko SV, Sanzharova NI. Radioecological problems of nuclear power engineering. *Atomnaya energiya. = Atomic Energy*. 1990;68(6): 320–328. (In Russian).
7. Panov AV, Fesenko SV, Sanzharova NI, Alexakhin RM, Prudnikov PV, Pasternak AD, et al. Influence of agricultural countermeasures on the population exposure in the territories affected by the Chernobyl NPP accident. *Radiatsiya i risk = Radiation and risk*. 2006;46(2): 273–279. (In Russian).
8. Sanzharova NI, Fesenko SV, Alexakhin RM, Abramova TN, Kuznetsov VK. Evaluation of the factors determining the dynamics of ^{137}Cs contamination of agricultural products after the Chernobyl NPP accident. *Radiatsionnaya biologiya. Radioekologiya = Radiation Biology. Radioecology*. 1995; 35(3): 307–315. (In Russian).
9. Fesenko SV, Alexakhin RM, Spiridonov SI, Sanzharova NI, Kolmykov MV. Regularities of changes in the ^{137}Cs content in animal products. *Radiatsionnaya biologiya. Radioekologiya = Radiation Biology. Radioecology*. 1995; 35(3): 316–327. (In Russian).
10. Fesenko SV, Jacob P, Alexakhin R, Sanzharova NI, Panov A, Fesenko G, 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.
11. 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.
12. Alexakhin RM, Fesenko SV, Sanzharova NI. Serious radiation accidents and the radiological impact on agriculture. *Radiation Protection Dosimetry*. 1996;64: 37–42.
13. 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.
14. 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.
15. Isamov NN (Jr.), Sirotkin AN, Fesenko SV, Sokolova EA, Sidorova EV. Regularities of migration of anthropogenic pollutants in the trophic chain of lactating cows. *Ekologiya = Ecology*. 1998;6: 441–446. (In Russian).
16. Alexakhin RM, Fesenko SV, Sanzharova NI, Spiridonov SI, Vorobyev GT, Yakovleva NA. On the reduction of ^{137}Cs concentrations in crops contaminated after the Chernobyl accident. *Doklady RASKHN = Doklady RASKHN*. 1995;3: 20–21. (In Russian).
17. Fesenko SV, Prudnikov PV, Isamov NN, Emlyutina ES, Titov IE. Dynamics of ^{137}Cs concentration in fodder in the long term after the Chernobyl accident. *Biology Bulletin*. 2022; 49(12): 153–162.
18. Methods and tools for radiation control (collection of materials). Kurganov AA and Mosharov VN. Editors. Moscow: Ministry of Agriculture; 1995. 178 p. (In Russian).
19. 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.
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. Fesenko SV, Isamov NN, Prudnikov PV, Emlyutina ES. Radioecological substantiation of the control levels of ^{137}Cs con-

- centrations in the fodder of farm animals. *Radiatsionnaya biologiya. Radioekologiya. = Radiation Biology. Radioecology.* 2021;61(6): 652–663. (In Russian).
22. Sanzharova NI, Fesenko SV, Romanovich IK, Marchenko TA, Razdayvodin AN, Panov AV, et al. Radiological aspects of the return of the territories of the Russian Federation, affected by the Chernobyl NPP accident, to the conditions of normal life activity. *Radiatsionnaya biologiya. Radioekologiya. = Radiation Biology. Radioecology.* 2016;56(2): 322–335. (In Russian).
 23. Fesenko SV, Prudnikov PV, Emlyutina ES, Epifanova IE, Shubina OA. Dynamics of ^{137}Cs concentrations in agricultural products of Bryansk region after the Chernobyl accident: grain, potatoes and vegetables. *Radiatsionnaya gygiyena = Radiation Hygiene.* 2022;15(4): 45–57. (In Russian).
 24. Fesenko SV, Prudnikov PV, Isamov NN, Emlyutina ES, Epifanova IE, Shubina OA. Dynamics of ^{137}Cs concentrations in the fodder of farm animals in the districts of Bryansk region affected after the Chernobyl accident. *Radiatsionnaya gygiyena = Radiation Hygiene.* 2023;16(1): 104–119. (In Russian).
 25. Gerasimova NV, Marchenko TA, Onishchenko GG, Perminova GS, Chelyukanov V, Agapov AM. 20 years of the Chernobyl catastrophe. results and problems of its overcoming in Russia. 1986–2006. Russian National Report. Moscow: IBRAE; 2006. 92 p. (In Russian).
 26. Geraskin SA, Fesenko SV, Chernyaeva LG, Sanzharova NI. Statistical methods of analyzing empirical distributions of radionuclide accumulation coefficients by plants. *Selskokhozyaystvennaya biologiya = Agricultural Biology.* 1991; (1): 130–137. (In Russian).
 27. Thiessen KM, Sazykina TG, Apostoei AI, Balonov MI, Crawford J, Domel R, et al. Model testing using data on ^{137}Cs from Chernobyl fallout in the Iput River catchment area of Russia. *Journal of Environmental Radioactivity.* 2005;84(2): 225–244.
 28. Fesenko S, Shinano T, Onda Y, 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.
 29. Fesenko S, Howard BJ, Isamov N, Voigt G, Beresford NA, Sanzharova N, et al. Review of Russian language studies on radionuclide behaviour in agricultural animals: 2. Transfer to milk. *Journal of Environmental Radioactivity.* 2007;98: 104–136.
 30. 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): 020509
 31. Fesenko SV, Colgan PA, Lissianski 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 doses resulting from the consumption of milk and milk products. *Radiation Protection Dosimetry.* 1997;69 (4): 289–299.
 32. Pröhl G, Ehlken S, Fiedler I, Kirchner G, Klemm E, Zibold G. Ecological half-lives of ^{90}Sr and ^{137}Cs in terrestrial and aquatic ecosystems. *Journal of Environmental Radioactivity.* 2006;91(1–2): 41–72.
 33. Muck K. Long-term effective decrease of caesium concentration in foodstuffs after nuclear fallout. *Health Physics.* 1997;72: 659–673.
 34. Smith JT, Fesenko SV, Howard BJ, Horrill D, Sanzharova N, Alexakhin R, 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.

Received: March 29, 2024

For correspondence: Sergey V. Fesenko – Chief Researcher, Russian Institute of Radiology and Agroecology of National Research Centre «Kurchatov Institute» (Kievskoye shosse, 1, bldg. 1, Kaluga Region, Obninsk, 249035, Russia; E-mail: Corwin_17F@mail.ru)

Nizametdin N. Isamov – Head of Laboratory, Russian Institute of Radiology and Agroecology of National Research Centre «Kurchatov Institute», Obninsk, Russia

Evgeniya S. Emlyutina – Researcher, Russian Institute of Radiology and Agroecology of National Research Centre «Kurchatov Institute», Obninsk, Russia

Evgeny I. Karpenko – Director, Russian Institute of Radiology and Agroecology of National Research Centre «Kurchatov Institute», Obninsk, Russia

Vadim A. Goryainov – Deputy Director of the Department of Agriculture of Bryansk region, Bryansk, Russia

For citation: Fesenko S.V., Isamov N.N., Emlyutina E.S., Karpenko E.I., Goryainov V.A. Dynamics of ^{137}Cs concentrations in cow milk in the districts of Bryansk region. *Radiatsionnaya Gygiyena = Radiation Hygiene.* 2024. Vol. 17, No. 3. P. 16–28. (In Russian). DOI: 10.21514/1998-426X-2024-17-3-16-28