

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

Фесенко С.В.¹, Емлютина Е.С.¹, Исамов Н.Н.¹, Карпенко Е.И.¹, Горяинов В.А.²

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

² Департамент сельского хозяйства Брянской области, Брянск, Россия

Данные по изменению концентрации ^{137}Cs в мышцах сельскохозяйственных животных в районах Брянской области, пострадавших после аварии на Чернобыльской АЭС, до настоящего времени практически не обобщались. Целью данного исследования являлся анализ данных радиологического мониторинга содержания ^{137}Cs в мясе сельскохозяйственных животных, в юго-западных районах Брянской области, подвергшихся интенсивному загрязнению после аварии на Чернобыльской АЭС. Материалы и методы: Проведен анализ данных о содержании ^{137}Cs в 27519 пробах мяса сельскохозяйственных животных, отобранных организациями Минсельхоза России в период с 1986 по 2013 гг. Определение ^{137}Cs в пробах проводили гамма-спектрометрическим методом. Результаты и обсуждение: Отмечено, что динамика изменения содержания ^{137}Cs в мышцах животных в значительной степени определялась особенностями проведения защитных мероприятий в сфере сельскохозяйственного производства. В первый год после аварии средние периоды полуснижения составляли 116 дней для говядины и 99 дней для свинины. В последующем (1987–1992 гг.) эффективные периоды полуснижения содержания ^{137}Cs варьировали в пределах от 1,5 до 1,6 лет. С 1993 года снижение содержания ^{137}Cs в мышцах животных замедлилось, а периоды полуснижения составляли 9,8 лет для говядины и 16,1 года для свинины. Отмечены различия в динамике снижения загрязнения мяса, производимого в общественном и частном секторе, а также в динамике содержания ^{137}Cs в свинине и говядине.

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

Введение

Авария на Чернобыльской АЭС (ЧАЭС) привела к долгосрочным негативным последствиям для сельского хозяйства загрязненных областей. Особенно высокие уровни загрязнения сельскохозяйственной продукции отмечались в юго-западных районах Брянской области, что обусловило необходимость интенсивного применения защитных мероприятий, включая ограничения на производство отдельных видов продукции. [1–12].

Особенно важным для обеспечения безопасного проживания сельского населения на загрязненных территориях было внедрение мероприятий, направленных на снижение загрязнения продукции животноводства – молока и мяса, вклад которых достигал до 90 % дозы внутреннего облучения населения [6–8, 12–18]. Для планирования и обоснования мероприятий в сфере сельскохозяйственного производства на загрязненных территориях был организован комплексный мониторинг загрязнения продукции агропромышленного комплекса (АПК) [19–24].

В Брянской области система мониторинга была создана на базе Центра агрохимрадиологии «Брянский»,

ветеринарного радиологического центра Брянской области, а также районных ветеринарных и агрохимических лабораторий [25–27]. Особенно интенсивно он проводился в шести юго-западных районах Брянской области и трех южных районах Калужской области, что позволило получить уникальные данные по закономерностям поведения ^{137}Cs в сфере АПК и поступления его в сельскохозяйственную продукцию [8, 18–27].

Проведение мониторинга в сфере сельского хозяйства в течение 35 лет после чернобыльской аварии обеспечило эффективное планирование проведения защитных и реабилитационных мероприятий в сфере АПК, а также позволило обосновать нормативы допустимых уровней содержания ^{137}Cs в сельскохозяйственной продукции и продуктах питания в различные периоды времени после аварии [24, 28, 29].

Анализ динамики загрязнения продукции растениеводства в течении 35-летнего периода после аварии на ЧАЭС приведен в наших публикациях [12, 20, 21, 25–26], тогда как закономерности динамики содержания ^{137}Cs в молоке в различные периоды после аварии описаны в наших публикациях [5, 7, 12, 16–19, 24, 28].

Фесенко Сергей Викторович

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

Адрес для переписки: 249032, Россия, Калужская область, г. Обнинск, Киевское шоссе, д. 1, корп. 1;

E-mail: Corwin_17F@mail.ru

Настоящая публикация включает анализ данных по изменению концентрации ^{137}Cs в мышцах сельскохозяйственных животных. Такого рода данные до настоящего времени практически не обобщались. Основной причиной этого являлось то, что контроль загрязнения мяса был организован на мясокомбинатах и включал входной радиационный контроль. Животные с концентрациями ^{137}Cs в мышцах выше допустимых уровней переводились на дополнительный откорм на чистых кормах. Эта мера существенно изменила естественную динамику изменения концентраций ^{137}Cs в организме животного, а концентрации радионуклидов, определяемые в результате выборочного выходного контроля, были близки к значениям временных допустимых уровней (ВДУ). Вследствие этого для анализа динамики содержания ^{137}Cs в мясе сельскохозяйственных животных в районах Брянской области, пострадавших после аварии на ЧАЭС, использовались данные, полученные непосредственно в хозяйствах, что позволяет провести их сопоставление с информацией по другим видам продукции.

В первых трех публикациях этого цикла [25–27] представлены данные по динамике изменения содержания ^{137}Cs в продукции растениеводства, кормах сельскохозяйственных животных и молоке на протяжении 35 лет после Чернобыльской аварии. Представленная публикация, в которой приводятся данные по концентрациям ^{137}Cs в мышцах животных, является заключительной статьей этого цикла. Данные по содержанию ^{137}Cs в молоке, которые не использовались для подготовки предыдущей статьи [27], включены в настоящую статью для сравнения динамики содержания ^{137}Cs в молоке и мясе сельскохозяйственных животных.

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 мясе сельскохозяйственных животных, производимого в юго-западных районах Брянской области, подвергшихся интенсивному радиоактивному загрязнению после аварии на ЧАЭС.

Задачи исследования

1. Обобщение данных по концентрациям ^{137}Cs в мышцах сельскохозяйственных животных, полученных организациями Минсельхоза России и ВНИИРАЭ после аварии на ЧАЭС.
2. Определение периодов полуснижения содержания ^{137}Cs в мышцах крупного рогатого скота (КРС) и свиней в различные временные интервалы после аварии.
3. Оценка роли факторов, определяющих динамику снижения содержания ^{137}Cs в мясе КРС после аварии на ЧАЭС.

Материалы и методы

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 семи юго-западных районах Брянской области: Гордеевском, Злынковском, Климовском, Клинцовском, Красногорском, Новозыбковском и Стародубском. Динамика проведения мониторинга молока и мяса показана на рисунке 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 оборудования и было принято решение о существенном увеличении числа отбираемых и измеряемых проб [22]. В 1991–1992 гг. объемы исследований проб молока, мяса и кормов для животных на территории Брянской области были максимальными. Некоторое увеличение интенсивности мониторинга загрязнения мяса в 1998–2004 гг. было связано с внедрением национальных программ Российской Федерации по преодолению последствий радиационных аварий [2, 3].

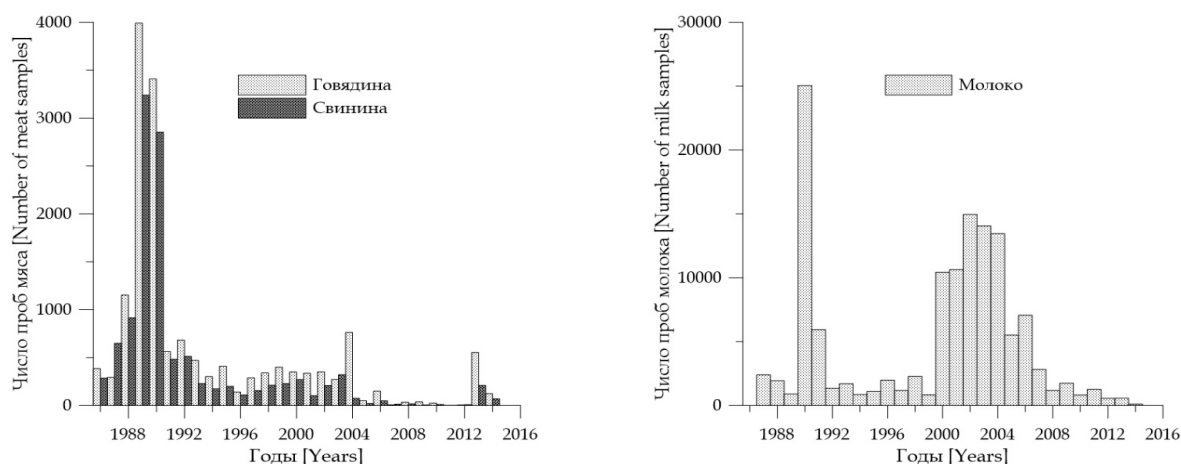


Рис. 1. Динамика измерения проб животноводства в юго-западных районах Брянской области после аварии на ЧАЭС

[Fig. 1. Dynamics of livestock sample measurement in southwestern districts of the Bryansk region after the Chernobyl accident]

Наиболее интенсивно мониторинг молока проводился в хозяйствах и населенных пунктах юго-западных районов Брянской области, в которых отмечались высокие плотности загрязнения ^{137}Cs сенокосов и пастбищ [25-27]. Объем мониторинга в целом соответствовал как плотности загрязнения сельскохозяйственных угодий, так и количеству хозяйств общественного и частного секторов. Данные, представленные на рисунке 1 показывают, что число отбираемых в юго-западных районах проб молока было существенно больше числа отбираемых проб мяса животных.

В период с 1986 по 2013 гг. было измерено 215 450 проб молока и 27 519 проб мяса сельскохозяйственных животных. При этом на одну измеренную пробу мяса крупного рогатого скота приходилось примерно 13 проб молока. Отмеченные различия определяются тем, что у каждой коровы в течение ее жизни по мере необходимости можно отобрать много проб молока, тогда как проба мяса может быть получена только один раз при убойе животного.

Анализ данных

Для анализа данных применялся такой же подход, как и в других статьях этой серии [25-27], то есть каждая выборка данных анализировалась на выбросы; для малых выборок, содержащих менее 25 значений, применялся критерий Диксона, а для выборок, содержащих 25 значений и более, применялись стандартные статистические критерии [28]. Поскольку критерий Диксона применяется к нормально распределенным величинам, для каждой выборки производился тест на «нормальность» распределения. После отбраковки данных определяли параметры распределения. Периоды полуснижения рассчитывались с помощью стандартных методов линейной регрессии [28].

Результаты и обсуждение

Динамика содержания ^{137}Cs в продукции животноводства: 1986 г.

Данные по динамике концентраций ^{137}Cs в продукции животноводства по данным работы [29] представлены на рисунке 2. Приведенные данные отражают различный характер поступления ^{137}Cs в молоко и другие виды продукции животноводства.

Максимальные концентрации ^{137}Cs в молоке отмечались в начале мая 1986 года, то есть уже через несколько дней после выпадений, что объясняется достаточно коротким временем, необходимым для поступления радионуклида в молочную железу. Наибольшие концентрации ^{137}Cs в мышцах животных отмечалось существенно позже. Максимальное содержание радионуклида в мышцах сельскохозяйственных животных в условиях, когда отмечалось достаточно быстрое уменьшение поверхностного загрязнения растений, достигалось только через несколько недель после выпадений. Кроме того, следует учитывать, что на рисунке 2 представлены усредненные по месяцам данные, что сглаживает наблюдаемую динамику изменения концентраций ^{137}Cs в продукции животноводства. Средние периоды полуснижения концентраций ^{137}Cs в продукции животноводства, рассчитанные для периода июнь–декабрь 1986 года достаточно близки, и отражают динамику самоочищения кормовых растений, используемых при формировании кормов для животных (рис. 2).

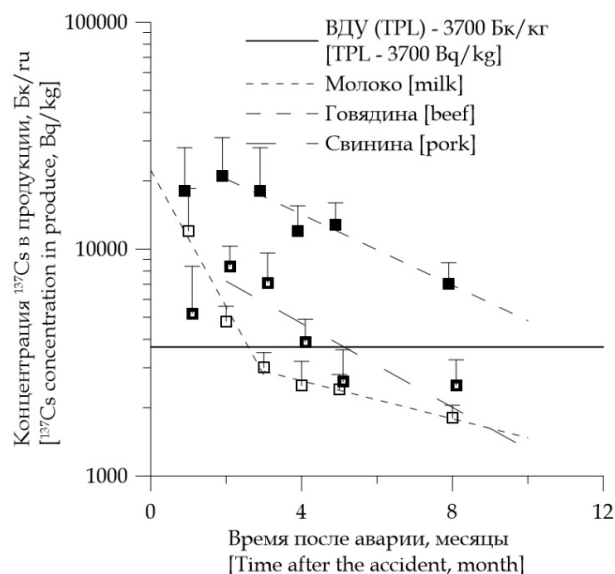


Рис. 2. Динамика содержания ^{137}Cs в продукции животноводства в 1986 году. Данные измерений представлены квадратами и среднеквадратичными отклонениями. Пунктирными и штрихпунктирными линиями показаны экспоненциальные аппроксимации этих данных

[Fig. 2. Dynamics of ^{137}Cs concentrations in animal products in 1986. Measurement data are presented by squares and standard deviations. The dotted and dashed lines show the exponential approximations of these data]

Вследствие особенностей поступления радионуклидов в продукцию животноводства аппроксимация данных за первый год после аварии отклоняется от экспоненциальной зависимости. Средние периоды полуснижения составили 116 дней ($R^2=0,71$) для говядины и 99 дней ($R^2=0,77$) для свинины. В динамике содержания радионуклидов в молоке наблюдаются два периода полуснижения: первый, равный 30 суткам ($R^2=0,97$), и второй, составляющий 210 суток ($R^2=0,97$).

Для обеспечения безопасности населения загрязненных территорий в мае 1986 года были введены нормативы на допустимое содержание радионуклидов в продукции [30]. Первый норматив, установленный 5 мая 1986 года, составлял 3700 Бк/л для ^{131}I в продукции. Позднее, 30 мая 1986 года, был введен норматив 3700 Бк/кг для молока и мяса. С 1 августа 1986 года вступил в силу более строгий норматив (370 Бк/л) на временно допустимое содержание бета-излучающих радионуклидов в молоке [1, 30]. В соответствии с этим изменялись контрольные уровни содержания ^{137}Cs в кормах, что обеспечивало связь между критериями обеспечения безопасности продуктов питания и критериями оптимизации реабилитационных мероприятий в сельском хозяйстве [31].

Данные, представленные на рисунке 2, показывают, что в юго-западных районах Брянской области ВДУ содержания радиоцезия в молоке и говядине превышались на протяжении всего 1986 года. Только в свинине содержание ^{137}Cs было ниже допустимых нормативов, начиная с октября–ноября 1986 года.

Динамика содержания ^{137}Cs в продукции животноводства: 1987–2013 гг.

На рисунке 3 приведены данные по динамике содержания ^{137}Cs в мясе животных – говядине и свинине – для всего периода времени, когда проводился мониторинг загрязнения продукции животноводства. Для сравнения на этом же рисунке показана динамика содержания ^{137}Cs в молоке и картофеле. Сплошной линией показаны ВДУ содержания ^{137}Cs в мясе и соответствующие периоды их действия.

По мере улучшения радиационной обстановки значения ВДУ в пищевых продуктах регулярно пересматривались в сторону уменьшения [32–33]. После чернобыльской аварии такой подход стимулировал сельскохозяйственных производителей к совершенствованию технологий и применению реабилитационных мероприятий в сельском хозяйстве [34–35].

Японские регулирующие органы, спустя год после аварии на АЭС «Фукусима-1», использовали аналогичный метод [32–33]. Этот подход близок концепции применения ре-

ферентных дозовых уровней, рекомендованной в Публикации 103 МКРЗ [35, 36]. Согласно этой концепции, использованной при подготовке международного стандарта безопасности GSR Part 3 [37], референтные уровни должны быть установлены в пределах рекомендуемого диапазона годовой дозы (1–20 мЗв) и впоследствии снижаться с течением времени, основываясь на анализе изменений радиационной обстановки на загрязненных территориях.

Установленные в 1991 году ВДУ содержания ^{137}Cs в говядине и в молоке были близки к средним уровням загрязнения, наблюдавшимся в наиболее пострадавших районах России в тот период. В дальнейшем концентрации ^{137}Cs в мясе уменьшались, что приводило к последовательному введению новых, более низких нормативов ВДУ. Таким образом, сопоставление динамики загрязнения молока и говядины с соответствующими изменениями ВДУ подтверждает соответствие применяемых мер общей концепции регулирования содержания ^{137}Cs в продуктах питания, описанной ранее.

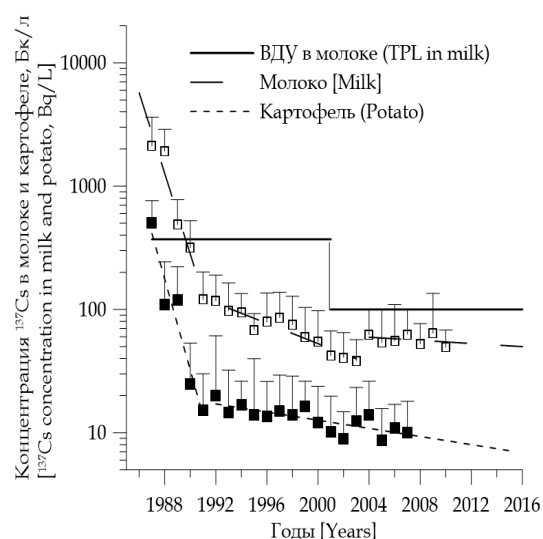
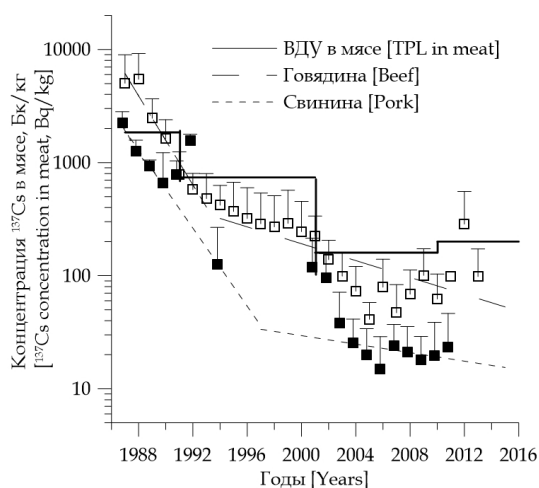


Рис. 3. Динамика содержания ^{137}Cs в сельскохозяйственной продукции в период с 1987 по 2013 гг. Данные измерений представлены квадратами и среднеквадратичными отклонениями. ВДУ показаны сплошной линией

[Fig. 3. Dynamics of ^{137}Cs concentrations in animal products from 1987 to 2013. Measurement data are presented by squares and standard deviations. TPLs are shown with a solid line]

Динамика снижения содержания ^{137}Cs в мясе существенно отличалась в разные периоды времени. Первый период охватывает 1987–1992 гг., когда мероприятия по снижению содержания ^{137}Cs проводились наиболее активно и охватывали все большие площади кормовых угодий. В этот период снижение содержания ^{137}Cs в продукции животноводства и кормах было обусловлено применением агротехнических мероприятий на сенокосах, пастбищах и пахотных землях, используемых для выращивания кукурузного силоса и концентрированных кормов [1].

В течении второго периода объемы применения мероприятий в сельском хозяйстве снизились, а темпы уменьшения загрязнения продукции сильно замедлились, в третий период в результате внедрения мероприятий федеральной целевой программы Российской Федерации «Сохранение и восстановление плодородия почв

земель сельскохозяйственного назначения и агроландшафтов как национального достояния России на 2006–2013 годы» произошло дальнейшее существенное уменьшение загрязнения продукции [1–5, 34].

После завершения мероприятий федеральной целевой программы динамика снижения содержания ^{137}Cs в кормовых растениях определялась как увеличением поступления ^{137}Cs в растения в результате уменьшения плодородия почв, так и естественным снижением биологической доступности радионуклидов в почвах под действием геохимических процессов [25–27].

Для анализа данных по динамике изменения содержания ^{137}Cs в мясе животных, так же, как и в предыдущих статьях этого цикла, использовался подход, основанный на использовании периодов полуснижения (таблица).

Таблица

Эффективные периоды полуснижения содержания ^{137}Cs в продукции животноводства в юго-западных районах Брянской области в 1987–2014 гг.

[Table

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

Виды продукции [Products]	$T_{1/2}^1$, лет [years]	R^2	$T_{1/2}^2$, лет [years]	R^2	$T_{1/2}^3$, лет [years]	R^2
Говядина [Beef]	1,64	0,95	9,8	0,85	–	–
Свинина [Pork]	1,54	0,97	16,1	0,6	> 50	0,2
Молоко [Milk]	0,92	0,95	7,3	0,84	46,2	0,1
Сено [Hay]	1,4	0,88	7,8	0,88	> 100	–
Зерно [Grain]	1,04	0,86	20,4	0,47	9,5	0,85
Картофель [Potato]	0,92	0,94	18,2	0,49	–	–

Периоды полуснижения рассчитывались для интервалов времени, когда темпы этого снижения содержания ^{137}Cs в продукции АПК были отличны. В соответствие с этим были рассчитаны периоды полуснижения концентраций ^{137}Cs в говядине и свинине $T_{1/2}^1$, $T_{1/2}^2$ и $T_{1/2}^3$ (таблица). Для сравнения в этой таблице показаны периоды полуснижения ^{137}Cs в других продуктах сельского хозяйства.

Первый, начальный период преодоления последствий чернобыльской аварии в сельском хозяйстве, соответствовал времени, когда мероприятия в сельском хозяйстве применялись наиболее активно. Периоды полуснижения содержания ^{137}Cs в говядине и свинине были довольно близки (1,54–1,64 года) и были несколько больше периодов полуснижения ^{137}Cs в молоке.

Продолжительность вторых периодов полуснижения (с 1993 по 2000 гг.) значительно варьировала: от 2,4 до 24 лет. Третьи периоды (начиная с 2000 года) длились от 10,5 лет до более чем 25 лет. Средние значения периодов полуснижения для юго-западных районов составили 1,4, 9,8 и 17,2 года. Важно отметить, что концентрация ^{137}Cs в свинине снижалась быстрее в первый период и медленнее во второй. Это согласуется с динамикой изменения содержания ^{137}Cs в зерне и картофеле – основных компонентах рациона свиней. Этот интервал включает промежуток времени, когда объемы проведения защитных агротехнических мероприятий сократились, а довольно низкие уровни загрязнения молока поддерживались за счет применения ферроцинсодержащих препаратов. В период с 2000 года мероприятия проводились в рамках федеральных целевых программ. В результате, в районах с наибольшими уровнями загрязнения молока отмечены как более короткие периоды полуснижения, так и наибольшие отличия измеренных уровней загрязнения молока от уровней загрязнения, оцененных на основе данных о загрязнении кормов.

Средние значения концентрации ^{137}Cs в свинине на протяжении всего рассматриваемого периода были существенно ниже, чем в говядине. Это позволяет предположить, что допустимые уровни содержания ^{137}Cs в говядине служили ориентиром при определении и изменении ВДУ для мяса и других мясных продуктов.

Коэффициенты перехода из рациона в мышцы животных варьируют в широком диапазоне. В последнее время был выполнен анализ данных научной информации как российских, так и мировых данных по коэффициентам перехода радионуклидов в продукцию животноводства [38–40]. По этим данным, в зависимости от продуктивности и условий содержания животных, коэффициенты перехода ^{137}Cs варьируют в диапазоне от 0,12 до 0,4 сутки/кг при геометрическом среднем 0,2 сутки/кг для свиней и от $4,7 \times 10^{-3}$ до $9,6 \times 10^{-3}$ сутки/кг при геометрическом среднем 0,022 сутки/кг для КРС.

Состав кормов в рационе животных также значительно варьирует. Типовые рационы кормления выбракованного взрослого КРС на заключительной стадии откорма могут включать до 40 кг зеленой массы растений (травы) в сутки в летний период и по 14 кг сенажа и силоса и 2 кг концентратов. Рекомендуемый для этого региона зимний рацион откорма мясных свиней весом 80 – 100 кг содержит 2,5 – 3,0 концентратов, 2,0 – 3,5 кг картофеля или зеленой массы, 100 г травяной муки, а также некоторые другие компоненты (такие как соль и мел), которые не оказывают влияние на загрязнение продукции. В частном секторе корма включают обрат, сыворотку и отходы кухни.

По данным многолетнего мониторинга в зоне аварии на ЧАЭС при содержании в сене 1 Бк/кг ^{137}Cs в других видах кормов, таких как силос, корнеплоды, концентрированные и зеленые корма, в среднем содержится 0,23, 0,17, 0,18 и 0,76 Бк/кг [31]. Таким образом можно ожидать, что суточное поступление ^{137}Cs при содержании радионуклида в кормах и составах рациона, описанных выше, составит 10 – 30 Бк/сут для КРС и 1–2 Бк/сут для свиней. При этих условиях концентрация ^{137}Cs в мышцах животных составит 0,3 – 0,7 Бк/кг для КРС и 0,2 – 0,3 Бк/сут для свиней, то есть в зависимости от рационов кормления животных концентрация ^{137}Cs в говядине будет в 1,5 – 2,2 раза выше, чем в свинине. Для оценки отношений концентрации ^{137}Cs в говядине к концентрации ^{137}Cs в свинине, адаптированных к условиям загрязненных районов Российской Федерации, расчеты проводились для каждой комбинации данных: хозяйство/вид продукции/год. Частотные распределения этих отношений, отражающих полученную выборку, представлены на рисунке 4.

Арифметические, геометрические средние, медианы и стандартные отклонения составили: 2,15, 1,69, 1,51 и 1,83 (75 значений) и 2,78, 2,02, 2,0 и 2,55 (78 значений) для частных и коллективных животных соответственно. Для всей выборки животных, для которых имелись данные, полученные в одном хозяйстве в один год и для обоих видов животных (больше 5 животных каждого вида), эти значения составили 2,47, 1,74, 1,85 и 2,25, соответственно (153 значения).

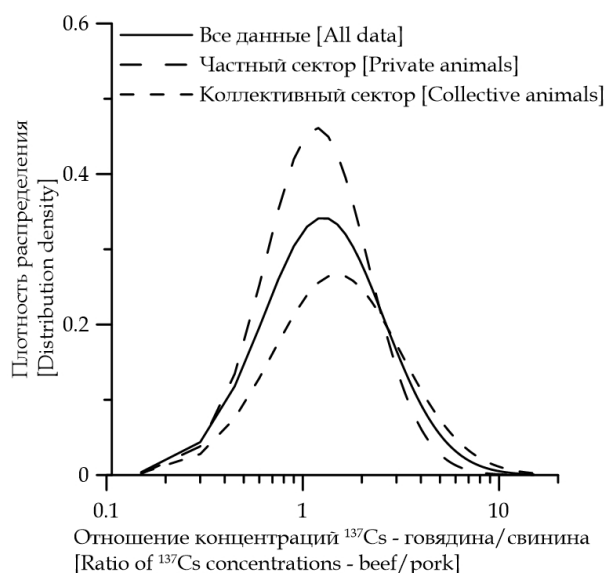


Рис. 4. Плотности распределения величин отношений концентраций ^{137}Cs в говядине к концентрациям этого радионуклида в свинине
[Fig. 4. Distribution densities of the ratio values of ^{137}Cs concentrations in beef to concentrations of the radionuclide in pork]

Представленные результаты показывают, что среднее значение отношений концентраций ^{137}Cs в говядине к среднему значению концентраций этого радионуклида

в свинине, рассчитанное на основе всех данных, составляет 2,47, геометрическое среднее отношение этих величин равно 1,85, а медиана этого распределения – 1,74. Эти величины хорошо согласуются с приведённой выше оценкой такого отношения, сделанной на основе рационов кормления этих животных (1,5 – 2,2).

Для частного сектора среднее отношение концентраций в говядине к свинине равно 2,15, то есть примерно на 30 % меньше, чем аналогичная величина для коллективного сектора (среднее отношение – 2,78), что отражает различие в содержании и кормления коллективных и частных животных. Для геометрических средних эти различия меньше и составляют 18 %.

При оценке радиологической обстановки в сфере АПК необходимо учитывать определенные различия в уровнях загрязнения мяса животных общественного и частного сектора (рис. 5). Эти различия связаны как с особенностями кормления и содержания этих видов животных, так и с особенностями применения защитных мероприятий, направленных на снижение загрязнения этих видов продукции.

Динамика снижения концентрации ^{137}Cs в продукции, производимой в частном и общественном секторе загрязненных районов, отличалась. Снижение концентраций ^{137}Cs в мясе КРС общественного стада происходило быстрее, чем у животных частного сектора, что объясняется особенностями мероприятий, направленных на снижение загрязнения продукции животноводства. Снижение содержания ^{137}Cs в свинине частных и общественных животных происходило практически одинаково, а содержание ^{137}Cs в продукции частного сектора было в 1,5 – 2,0 раза меньше, чем в продукции общественного сектора.

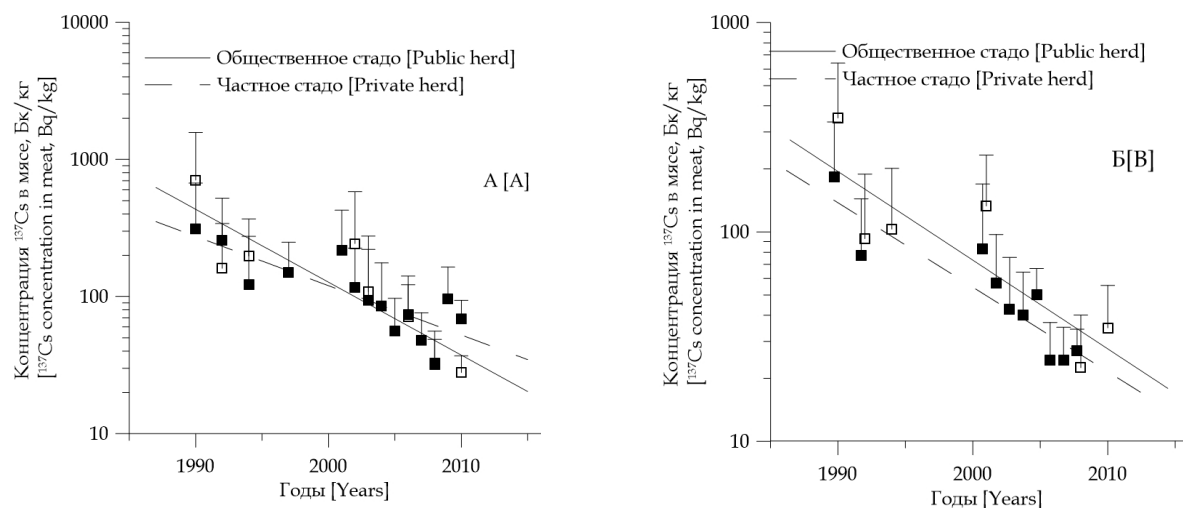


Рис. 5. Динамика концентраций ^{137}Cs в мясе животных, получаемом в коллективном и частном секторе. А – говядина, Б – свинина. Данные измерений представлены квадратами и среднеквадратичными отклонениями. ВДУ показаны сплошной линией

[Fig. 5. Dynamics of concentrations in meat from collective and private sector animals. A - beef, B - pork. Measurement data are presented by squares and standard deviations. TPLs are shown with a solid line]

При оценке данных, представленных на рисунке 5 следует отметить, что данные, полученные в процессе проведения мониторинга в районах Брянской области, подвергшихся загрязнению, в целом согласуются с данными исследований,

выполненных в других регионах [41-43] и могут быть использованы для обоснования возвращения территорий, пострадавших в результате аварии на Чернобыльской АЭС, к условиям нормальной жизнедеятельности [44].

Заключение

Анализ данных по закономерностям изменения содержания ^{137}Cs в мясе сельскохозяйственных животных показал, что динамика содержания радиоцезия в мышцах сельскохозяйственных животных зависела от особенностей проведения агротехнических и агрохимических реабилитационных мероприятий в районах, подвергшихся загрязнению после аварии на Чернобыльской АЭС. В 1986 году, после достижения максимальных концентраций, отмечено снижение содержания этого радионуклида в продукции со средними периодами полуснижения для говядины 116 дней ($R^2=0,71$) и для свинины 99 дней ($R^2=0,77$).

Снижение загрязнения мяса сельскохозяйственных животных было неравномерным, но темпы снижения были медленнее снижения содержания ^{137}Cs в молоке. Отмечены различия в динамике снижения содержания ^{137}Cs в говядине и свинине. Первые периоды полуснижения с 1987 по 1993 гг. составили 1,64 и 1,54 года для говядины и свинины соответственно, а вторые периоды – от 9,8 до 16,1 года. Динамика снижения загрязнения продукции животных общественного и частного сектора отличалась вследствие особенностей в кормлении и содержании животных и различий в применяемых защитных мероприятиях.

Сведения о личном вкладе авторов в работу над статьей

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

Емлютина Е.С. – обработка и анализ 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.

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

Благодарности

Авторы выражают свою признательность рецензентам за ценные замечания, позволившие улучшить представление материалов.

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 биотехнологические 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-vniiirae/444-osnovnye-nauchnye-publikatsii-sotrudnikov-fgbnu-vniiirae-v-2018-g>. (Дата обращения: 22.01.2023).
2. 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.
3. 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.
4. 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.
5. 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. DOI: 10.1093/oxfordjournals.rpd.a082712.
6. Balonov M.I., Anspaugh L.R., Bouville A., Likhtarev I.A. 2007 Contribution of internal exposures to the radiological consequences of the Chernobyl accident // Radiation Protection Dosimetry. 2007. Vol. 127, No 1-4. P. 491–496. DOI: 10.1093/rpd/ncm301.
7. 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. DOI: 10.1093/oxfordjournals.rpd.a031563.
8. 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.
9. Алексахин Р.М., Козьмин Г.В., Санжарова Н.И., Фесенко С.В. О реабилитации территорий, подвергшихся загрязнению // Вестник РАСХН. 1994. № 2. С. 28–30.
10. 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.
11. 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.
12. 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. Vol. 69, No 4. P. 289–299. DOI: 10.1093/oxfordjournals.rpd.a006445.
13. 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. DOI: 10.1016/S0265-931X(01)00047-9.
14. 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. <https://doi.org/10.21870/0131-3878-2023-32-4-67-78>.

15. Брук Г.Я., Базюкин А.Б., Братилова А.А., Яковлев В.А. Закономерности формирования и прогноз доз внутреннего облучения населения Российской Федерации и его критических групп в отдаленный период после аварии на Чернобыльской АЭС // Радиационная гигиена. 2019. Т. 12, № 2(св). С. 66-74. DOI: 10.21514/1998-426X-2019-12-2s-66-74.
16. 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. DOI: 10.1016/S0265-931X(01)00048-0.
17. Санжарова Н.И., Фесенко С.В., Алексахин Р.М. и др. Оценка факторов, определяющих динамику загрязнения ¹³⁷Cs сельскохозяйственной продукции после аварии на Чернобыльской АЭС // Радиационная биология. Радиоэкология. 1995. Т. 35, № 3. С. 307–315.
18. Фесенко С.В., Алексахин Р.М., Спиридонов С.И. и др. Закономерности изменения содержания ¹³⁷Cs 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.
19. 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.
20. Алексахин Р.М., Фесенко С.В., Санжарова Н.И. и др. О снижении содержания ¹³⁷Cs в продукции растениеводства, подвергшейся загрязнению после аварии на Чернобыльской АЭС // Доклады РАСХН. 1995. № 3. С. 20–21.
21. Fesenko S.V., Prudnikov P.V., Isamov N.N. et al. Dynamics of ¹³⁷Cs concentration in fodder in the long term after the Chernobyl accident // Biology Bulletin. 2022. Vol. 49(12) P. 153–162.
22. Методы и средства радиационного контроля / Под ред. А.А. Курганова, В.Н. Мошарова. Министерство сельского хозяйства. М.: 1995. 178 с.
23. 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. https://DOI: 10.3897/nucet.8.82619.
24. Fesenko S., Kashparov V., Levchuk S. et al. Monitoring in animal breeding in response to nuclear or radiological emergencies: Chernobyl experience // Journal of Environmental Radioactivity. 2021. Vol. 233. P. 106603. doi.org/10.1016/j.jenvrad.2021.106603.
25. Фесенко С.В. Прудников П.В., Емлютина Е.С. и др. Динамика содержания ¹³⁷Cs в сельскохозяйственной продукции Брянской области после аварии на ЧАЭС: зерно, картофель и овощи // Радиационная гигиена. 2022. Т. 15, № 4. С. 45–57. DOI: 10.21514/1998-426X-2022-15-4-45-57.
26. Фесенко С.В., Прудников П.В., Исамов Н.Н. и др. Динамика содержания ¹³⁷Cs 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.
27. Фесенко С.В., Исамов Н.Н., Емлютина Е.С. и др. Динамика содержания ¹³⁷Cs 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.
28. 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.
29. Thiessen K.M., Sazykina T.G., Apostoei A.I. et al. Model testing using data on ¹³⁷Cs from Chernobyl fallout in the Iput River catchment area of Russia // Journal of Environmental Radioactivity. 2005. 84(2). P. 225–244. DOI: 10.1016/j.jenvrad.2004.10.016.
30. 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. https://doi.10.1088/1361-6498/aabe34.
31. 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.
32. Fesenko S.V. A comparative analysis of the consequences of accidents at Chernobyl and Fukushima Daiichi (Japan) NPPs for agriculture and the environment // Atomic Energy. 2024. No 135. P. 195–205 DOI: 10.1007/s10512-024-01101-y.
33. Фесенко С.В. Десять уроков аварийного реагирования после аварии на АЭС «Фукусима-1» // Технологии гражданской безопасности. 2024. Т. 21. С. 21–27.
34. Фесенко С.В. Уроки крупных радиационных аварий для аварийного реагирования в сельском хозяйстве // Атомная энергия. 2024. Т. 136, вып. 3-4. С. 160-167.
35. International Commission on Radiological Protection. 2007 Recommendations of the International Commission on Radiological Protection. ICRP Publication 103 // Annals of the ICRP. 2007. Vol. 37, No 2–4.
36. International Commission on Radiological Protection. 2009 Application of the Commission's recommendations to the protection of people living in long-term contaminated areas after a nuclear accident or a radiation emergency. ICRP Publication 111 Annals of the ICRP. 2009. No 39.
37. International Atomic Energy Agency, Radiation Protection and Safety of Radiation Sources: International Basic Safety Standards, IAEA Safety Standards Series No. GSR Part 3, IAEA, Vienna, 2014. DOI: 10.61092/iaea.u2pu-60vm.
38. Fesenko S., Isamov N., Howard B.J. et al. Review of Russian language studies on radionuclide behaviour in agricultural animals: 3. Transfer to muscle // Journal of Environmental Radioactivity. 2009. No 100. P. 215–231. DOI: 10.1016/j.jenvrad.2008.12.003.
39. Fesenko S., Isamov N., Howard B.J. et al. Review of Russian language studies on radionuclide behaviour in agricultural animals: part 1. Gut absorption // Journal of Environmental Radioactivity. 2007. No. 98. P. 85–103. DOI: 10.1016/j.jenvrad.2007.02.011.
40. 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. DOI: 10.1016/j.jenvrad.2007.06.007.
41. 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. 2007. Vol. 42, № 2. P. 020509. DOI: 10.1088/1361-6498/ac670c.
42. Pröhl G., Ehlen S., Fiedler I. et al. Ecological half-lives of ⁹⁰Sr and ¹³⁷Cs in terrestrial and aquatic ecosystems // Journal of Environmental Radioactivity 2006. Vol. 91, No. 1–2. P. 41–72. DOI: 10.1016/j.jenvrad.2006.08.004.
43. Muck K. Long-term effective decrease of caesium concentration in foodstuffs after nuclear fallout // Health Physics. 1997. Vol. 72. P. 659–673.
44. 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: 14.05.2025

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, г. Обнинск, Киевское шоссе, д. 1, корп. 1; E-mail: Corwin_17F@mail.ru

ORCID: 0000-0003-1238-3689; SPIN: 9844-0605

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

ORCID: 0000-0002-8660-8679; SPIN: 9231-3364

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

ORCID: 0000-0002-5139-0315; SPIN: 7630-1760

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

ORCID: 0000-0002-9022-7940; SPIN: 6617-8122

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

SPIN: 3613-8498

Для цитирования: Фесенко С.В., Емлютина Е.С., Исамов Н.Н., Карпенко Е.И., Горяинов В.А. Динамика содержания ^{137}Cs в мясе сельскохозяйственных животных в районах Брянской области, пострадавших после аварии на ЧАЭС // Радиационная гигиена. 2025. Т. 18, № 2. С. 87–97. DOI: 10.21514/1998-426X-2025-18-2-87-97

Dynamics of ^{137}Cs concentrations in meat of farm animals in the districts of the Bryansk region affected after the Chernobyl accident

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

¹ Russian Institute of Radiology and Agroecology of National Research Centre “Kurchatov Institute”, Obninsk, Russia

² Department of Agriculture of Bryansk region, Bryansk, Russia

Data on dynamics in ^{137}Cs concentration in muscles of farm animals obtained by the organizations of the Ministry of Agriculture of Russia in the areas of the Bryansk region affected after the Chernobyl accident have not been practically generalized so far. The aim of this study was to analyse the data of radioecological monitoring of ^{137}Cs content in meat of farm animals in the south-western districts of the Bryansk region subjected to intensive contamination after the Chernobyl accident. Materials and Methods: The data on the ^{137}Cs concentrations in 27519 samples of farm animal meat collected by the organizations of the Ministry of Agriculture of Russia in the period from 1986 to 2013 were analysed. Determination of ^{137}Cs in samples was carried out by gamma-spectrometric method. Results and Discussion: The dynamics of ^{137}Cs content in animal muscle tissue were largely determined by the specific protective measures implemented in agricultural production. In the initial year following the accident, the average half-life was 116 days for beef and 99 days for pork. Between 1987 and 1992, the effective half-life ranged from 1.5 to 1.6 years. After 1993, the decline in ^{137}Cs levels in animal muscles slowed significantly, with half-lives extending to 9.8 years for beef and 16.1 years for pork. The rate of contamination decrease differed between meat produced in the public and private sectors, as well as between beef and pork.

Key words: Chernobyl NPP, agro-industrial production, meat of farm animals, south-western districts of the Bryansk region, radiation monitoring, ^{137}Cs .

Authors' personal contribution

Sergey V. Fesenko – development of research concepts; analysis and interpretation of data; writing and 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.

Evgeniya S. Emlyutina – data processing, analysis, and interpretation; agreement to be responsible for all aspects of the paper,

Sergey V. Fesenko

Russian Institute of Radiology and Agroecology of National Research Centre “Kurchatov Institute”

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

ensuring proper investigation and resolution of issues related to the accuracy of any part of the paper.

Nizametdin N. Isamov – data collection, analysis, and interpretation; agree 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.

Conflict of interests

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

Acknowledgments

The authors express their gratitude to the reviewers.

Sources 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 (project 5P.7. "Applied genetic and biotechnological research for agriculture").

References

- 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).
- Gerasimova NV, Marchenko TA, Onishchenko GG, Perminova GS, Chelyukanov V, Agapov AM, et al. 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).
- 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).
- Alexakhin RM, Kryshev II, Sanzharova NI, Fesenko SV. Radioecological consequences of the Chernobyl accident. Moscow: NS of the USSR; 1991. 190 p. (In Russian).
- 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. DOI: 10.1093/oxfordjournals.rpd.a082712.
- Balonov MI, Anspaugh LR, Bouville A, Likhtarev IA. Contribution of internal exposures to the radiological consequences of the Chernobyl accident. *Radiation Protection Dosimetry*. 2007;127: 491–496. DOI: 10.1093/rpd/ncm301.
- Alexakhin RM, Fesenko SV, Sanzharova NI. Serious radiation accidents and the radiological impact on agriculture. *Radiation Protection Dosimetry*. 1996;64: 37–42. DOI: 10.1093/oxfordjournals.rpd.a031563.
- 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. <https://doi.org/10.1097/01.HP.0000285093.63814.b7>.
- Alexakhin RM, Kozmin GV, Sanzharova NI, Fesenko SV. On rehabilitation of territories subjected to contamination. *Vestnik RASKHN = Bulletin RASKHN*. 1994;2: 28–30. (In Russian).
- 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).
- Alexakhin RM, Kryshev II, Fesenko SV, Sanzharova NI. Radiocological problems of nuclear power engineering. *Atomnaya energiya. = Atomic Energy*. 1990;68(6): 320–328. (In Russian).
- 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. DOI: 10.1093/oxfordjournals.rpd.a006445.
- 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. DOI: 10.1016/S0265-931X(01)00047-9.
- 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).
- Bruk GYa, Bazyukin AB, Bratilova AA, Yakovlev VA. Trends of development and prediction of the doses from the internal exposure of the public of the Russian Federation and its critical groups in the distant post-Chernobyl NPP accident period. *Radiatsionnaya Gygiena = Radiation Hygiene*. 2019;12(2): 66–74. (In Russian). DOI: 10.21514/1998-426X-2019-12-2s-66-74.
- 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. DOI: 10.1016/S0265-931X(01)00048-0.
- 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).
- 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).
- Isamov NN, 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).
- 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 = Reports of RASKHN*. 1995;3: 20–21. (In Russian).
- 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.
- Methods and tools for radiation control (collection of materials). Kurganov AA and Mosharov VN. Eds. Moscow: Ministry of Agriculture; 1995. 178 p. (In Russian).
- 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.
- Fesenko S, Kashparov V, Levchuk S, Khomutinin Yu, Lazarev N, Shubina O, et al. Monitoring in animal breeding in response to nuclear or radiological emergencies: Chernobyl experience. *Journal of Environmental Radioactivity*. 2021;233: 106603. doi.org/10.1016/j.jenvrad.2021.106603.

25. 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 Gygiena = Radiation Hygiene*. 2022;15(4): 45–57. (In Russian). DOI: 10.21514/1998-426X-2022-15-4-45-57.
26. 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 Gygiena = Radiation Hygiene*. 2023;16(1): 104–119. (In Russian). DOI: 10.21514/1998-426X-2023-16-1-104-119.
27. Fesenko SV, Isamov NN, Emlyutina ES, Karpenko EI, Goryainov VA. Dynamics of ^{137}Cs concentrations in cow milk in the districts of Bryansk region. *Radiatsionnaya Gygiena = Radiation Hygiene*. 2024; 17(3):16-28. (In Russian). DOI: 10.21514/1998-426X-2024-17-3-16-28.
28. Geras'kin SA, Fesenko SV, Chernyaeva LG, Sanzharova NI. Statistical methods of analyzing empirical distributions of radionuclide accumulation coefficients by plants. *Selskhozaystvennaya biologiya = Agricultural Biology*. 1991;1: 130–137. (In Russian).
29. 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. DOI: 10.1016/j.jenvrad.2004.10.016.
30. 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*. 201;38: 854–867. DOI: 10.1088/1361-6498/aabe34.
31. Fesenko SV, Isamov NN, Prudnikov PV, Emlyutina ES. Radioecological substantiation of the control levels of ^{137}Cs concentrations in the fodder of farm animals. *Radiatsionnaya biologiya Radioekologia = Radiation Biology. Radioecology*. 2021;61(6): 652–663. (In Russian).
32. Fesenko SV. A comparative analysis of the consequences of accidents at Chernobyl and Fukushima Daiichi (Japan) NPPs for agriculture and the environment. *Atomic Energy*. 2024;135: 195–205. DOI: 10.1007/s10512-024-01101-y.
33. Fesenko SV. Ten lessons of emergency response after the Fukushima-1 accident. *Civil Safety Technologies*. 2024;21: 21–27. (In Russian).
34. Fesenko SV. Lessons of Large Radiation Accidents for Emergency Response in Agriculture. *Atomic Energy*. 2024;136(3-4): 160–167. (In Russian).
35. International Commission on Radiological Protection. 2007 Recommendations of the International Commission on Radiological Protection. ICRP Publication 103. *Annals of the ICRP*. 2007; 37(2–4).
36. International Commission on Radiological Protection. Application of the Commission's recommendations to the protection of people living in long-term contaminated areas after a nuclear accident or a radiation emergency. ICRP Publication 111. *Annals of the ICRP*. 2009; 39.
37. International Atomic Energy Agency, Radiation Protection and Safety of Radiation Sources: International Basic Safety Standards, IAEA Safety Standards Series No. GSR Part 3, IAEA, Vienna; 2014. DOI: 10.61092/iaea.u2pu-60vm.
38. Fesenko S, Isamov N, Howard BJ, Beresford NA, Barnett CL, Sanzharova N, et al. Review of Russian language studies on radionuclide behaviour in agricultural animals: 3. Transfer to muscle. *Journal of Environmental Radioactivity*. 2009;100: 215–231. DOI: 10.1016/j.jenvrad.2008.12.003.
39. Fesenko S, Isamov N, Howard BJ, Voigt G, Beresford NA, Sanzharova N. Review of Russian language studies on radionuclide behaviour in agricultural animals: part 1. Gut absorption. *Journal of Environmental Radioactivity*. 2007;98: 85–103. DOI: 10.1016/j.jenvrad.2007.02.011.
40. 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. DOI: 10.1016/j.jenvrad.2007.06.007.
41. Tagami K, Hashimoto S, Kusakabe M, Onda Yu, 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. DOI: 10.1088/1361-6498/ac670c.
42. Pröhl G, Ehken S, Fiedler I, Kirchner G, Klemt 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. DOI: 10.1016/j.jenvrad.2006.08.004.
43. Muck K. Long-term effective decrease of caesium concentration in foodstuffs after nuclear fallout. *Health Physics*. 1997;72: 659–673.
44. Sanzharova NI, Fesenko SV, Romanovich IK, Marchenko TA, Razdayvodin AN, Panov AV, et al. Radiological aspects of returning the territories of the Russian Federation, affected by the Chernobyl NPP accident, to the conditions of normal life activity. *Radiatsionnaya biologiya Radioekologia = Radiation Biology. Radioecology*. 2016;56(2): 322–335. (In Russian).

Received: May 14, 2025

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

ORCID: 0000-0003-1238-3689; SPIN: 9844-0605

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

ORCID: 0000-0002-8660-8679; SPIN: 9231-3364

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

ORCID: 0000-0002-5139-0315; SPIN: 7630-1760

Evgeny I. Karpenko – Deputy Director, Russian Institute of Radiology and Agroecology of National Research Centre “Kurchatov Institute”, Obninsk, Russia

ORCID: 0000-0002-9022-7940; SPIN: 6617-8122

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

SPIN: 3613-8498

For citation: Fesenko S.V., Emlyutina E.S., N.N. Isamov, Karpenko E.I., Goryainov V.A. Dynamics of ^{137}Cs concentrations in meat of farm animals in the districts of the Bryansk region affected after the Chernobyl accident. *Radiatsionnaya Gygiena = Radiation Hygiene*. 2025. Vol. 18, No. 2. P. 87–97. (In Russian). DOI: 10.21514/1998-426X-2025-18-2-87-97