

Динамика содержания ^{137}Cs в сельскохозяйственной продукции Брянской области после аварии на ЧАЭС: зерно, картофель и овощи

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

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

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

Целью исследования являлся анализ закономерностей изменения содержания ^{137}Cs в зерне, картофеле и овощах в районах, подвергшихся загрязнению после аварии на Чернобыльской АЭС. Приведены данные, характеризующие проведение защитных мероприятий в юго-западных районах Брянской области. Описана система радиологического мониторинга загрязнения продукции растениеводства и представлены соответствующие данные. Динамика изменения содержания ^{137}Cs как в зерне, так и в картофеле и овощах носила ярко выраженный неоднородный характер. Снижение концентрации ^{137}Cs в продукции растениеводства определялось динамикой проведения агрохимических защитных мероприятий в районах, подвергшихся загрязнению, сорбцией ^{137}Cs в почве и радиоактивным распадом. Показано, что эффективные периоды полуснижения содержания ^{137}Cs в отмеченных видах продукции в период интенсивного проведения защитных и реабилитационных мероприятий (1987–1990 гг.) варьировали в пределах от 0,7 до 1,3 лет. В последующем (1991–2011 гг.) в большинстве районов снижение загрязнения продукции замедлилось, а в некоторых районах, где мероприятия проводились особенно интенсивно, отмечалось определенное увеличение содержания ^{137}Cs в сельскохозяйственной продукции. Эффективные периоды полуснижения в этот период составляли от 10,5 до 29 лет в зависимости от особенностей применения мероприятий, вида растений и характеристик почв. Характер изменения содержания ^{137}Cs в зерне различных районов в период с 2011 до 2021 г. также отличался в зависимости от особенностей проведения мероприятий в этих районах в предыдущие периоды.

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

Введение

Аварии на ЧАЭС часто рассматривают как «сельскую аварию» [1]. Так, загрязнение сельскохозяйственных угодий и вызванное этим производство продукции с повышенным содержанием радиоактивных веществ было и остается одним из основных источников облучения населения, проживающего на загрязненных территориях [2–5].

Во-первых, на всех этапах поставарийного периода вклад внутреннего облучения (т.е. облучения, связанного с потреблением загрязненных продуктов питания) составляет значительную долю в структуре суммарных дозовых нагрузок на человека (достигая в отдельных случаях до 70% и более) [4–7].

Во-вторых, радиоактивное загрязнение сельскохозяйственной сферы охватило очень большие площади. Только в границах зоны с плотностью загрязнения ^{137}Cs свыше 1 Ки/км² (37 кБк/м²) эта территория составила 150 тыс. км² [8,9]. В загрязненных районах Брянской,

Орловской и Тульской областей производилось от 40 до 70% зерна, до 60% картофеля от общего производства в этих областях [4, 8].

В-третьих, среди населения, подвергающегося дополнительному облучению вследствие аварийного загрязнения окружающей среды, преобладают сельские жители. Наконец, в-четвертых, при одинаковой плотности выпадений дозы облучения селян, как правило, выше, чем населения, проживающего в городах [5, 10, 11].

Для решения задач, связанных со смягчением последствий аварии в агропромышленном комплексе (АПК) загрязненных регионов, в России была создана широко-масштабная система радиационного контроля и мониторинга сельскохозяйственных объектов, проведено её техническое оснащение. За период после аварии было проведено более 250 тыс. измерений содержания радионуклидов в продукции растениеводства (включая корма для животных) и более 1 млн измерений содержания радионуклидов в продукции животноводства. Проведение

Фесенко Сергей Викторович

Всероссийский научно-исследовательский институт радиологии и агроэкологии

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

радиационного контроля обеспечило выявление сельскохозяйственной продукции, не соответствующей временным допустимым уровням (ВДУ), что позволило принять оперативные меры по переработке этой продукции, а также обосновать объемы внедрения защитных и реабилитационных мероприятий в хозяйствах и оценить реальный эффект от их внедрения. Кроме того, использование этих данных позволяет оценить динамику изменения содержания радионуклидов в продукции сельского хозяйства, что имеет важное значение для оценки возможности перехода к условиям нормальной жизнедеятельности. К настоящему времени данные мониторинга сельскохозяйственной продукции на загрязненных территориях охватывают 35-летний период. В то же время объемы и периоды проведения мониторинга различных видов продукции существенно отличались. Так, период мониторинга содержания ^{137}Cs в овощах и картофеле, проводимый организациями Министерства сельского хозяйства России, проводился до 2007 г., тогда как измерения содержания ^{137}Cs в зерне и кормовых культурах выполнялись с 1986 по 2021 г.

Существенно отличались и объемы проведения мониторинга в отдельных районах Брянской области. Так, до настоящего времени наблюдения проводились в хозяйствах 6 наиболее загрязненных районов: Гордеевского, Злынковского, Климовского, Клинцовского, Красногорского и Новозыбковского, тогда как в хозяйствах и населенных пунктах Стародубского района отбор проб выполнялся в ограниченных масштабах. В настоящее время финансирование системы мониторинга в районах, пострадавших после аварии на ЧАЭС, практически прекращено.

Анализ динамики содержания ^{137}Cs в сельскохозяйственной продукции для первого периода после аварии, охватывающий 1986–1994 гг., представлен в публикациях [2–4], однако данные последующего периода обобщались недостаточно, что ограничивает использование результатов мониторинга, проводимого организациями Минсельхоза России, для решения задач, связанных с обоснованием перехода населения, проживающего на загрязненных территориях, к

условиям нормальной жизнедеятельности. Важное значение эти данные имеют и для оценки последствий других потенциально возможных аварий и планирования аварийного реагирования.

Цель исследования – анализ закономерностей изменения содержания ^{137}Cs в зерне, картофеле и овощах в некоторых районах Брянской области, подвергшихся загрязнению после аварии на Чернобыльской АЭС. Предполагается, что данные о концентрации этого радионуклида в кормовых растениях, молоке и мясе сельскохозяйственных животных будут представлены в последующих публикациях.

Задачи исследования

При проведении исследований решались следующие задачи:

1. Обобщение данных по концентрациям ^{137}Cs в зерне, картофеле и овощах, полученных организациями Минсельхоза России с 1986 до 2021 г.
2. Оценка периодов полуснижения содержания ^{137}Cs в вышеперечисленной продукции в различные временные интервалы после аварии на Чернобыльской АЭС.
3. Оценка роли факторов, определяющих динамику снижения содержания ^{137}Cs в зерне, картофеле и овощах после аварии.

Материалы и методы

Для анализа параметров снижения содержания ^{137}Cs в продукции растениеводства использовались данные мониторинга, проводимого центром «Агрохимрадиология «Брянский» и областной ветеринарной радиологической лабораторией в 7 юго-западных районах Брянской области: Гордеевском, Злынковском, Климовском, Клинцовском, Красногорском, Новозыбковском и Стародубском [4, 12, 13]. В рамках этих исследований отбирались пробы основных видов продукции растениеводства, включая зерно, картофель, овощи, производимые в хозяйствах, находящихся на загрязнённой территории. Количество данных, использованных для оценки закономерностей изменения концентраций ^{137}Cs с 1986 по 2021 гг. в зерне, картофеле и овощах, приведено в таблице 1 [12–13].

Количество данных, использованных для оценок

Таблица 1

[Table 1

Quantity of data used for evaluations]

Районы [Districts]	Плотность загрязнения в 1986 г., кБк/м ² [Contamination density of soil in 1986, kBq/m ²]	Площадь, км ² [Area, km ²]	Зерно [Grain]	Картофель [Potato]	Овощи [Vegetables]	Всего [Total]
Гордеевский [Gordeyevsky]	562	327	3381	827	283	4491
Злынковский [Zlunkovsky]	459	253	1801	387	170	2358
Климовский [Klimovsky]	196	779	2855	2717	2217	7789
Клинцовский [Klintsovsky]	263	444	7107	528	497	8132
Красногорский [Krasnogorsky]	574	424	3769	1301	351	5421
Новозыбковский [Novozybkovsky]	772	391	9717	2237	1203	13157

Районы [Districts]	Плотность загрязнения в 1986 г., кБк/м ² [Contamination density of soil in 1986, kBq/m ²]	Площадь, км ² [Area, km ²]	Зерно [Grain]	Картофель [Potato]	Овощи [Vegetables]	Всего [Total]
Стародубский [Starodubsky]	45	918	1968	1122	454	3544
Всего [Total]	327	3536	30598	9119	5175	44892

Данные, представленные в таблице 1, отражают результаты систематического отбора проб, проведенного в 70 хозяйствах с плотностью загрязнения сельскохозяйственных угодий от 29 до 1394 кБк/м².

Наиболее высокие плотности загрязнения ¹³⁷Cs пашни (свыше 500 кБк/м²) отмечены в Новозыбковском, Красногорском и Гордеевском районах Брянской области. Злынковский район (459 кБк/м²) в этом ряду занимает промежуточное положение, а минимальные, хотя и достаточно существенные, уровни загрязнения ¹³⁷Cs пахотных угодий (150–300 кБк/м²) отмечены в Стародубском, Клинцовском и Климовском районах. Объем проведения мониторинга в этих районах в целом соответствовал как плотности загрязнения пашни, так и объемам производимой продукции.

Данные радиологического мониторинга содержания ¹³⁷Cs в сельскохозяйственной продукции включали следующую информацию: дата отбора, объем обследуемой продукции в тоннах, число отобранных проб, объемы и процент проб с превышением нормативов, среднее, минимальное и максимальное значение, рассчитанные для каждого хозяйства и вида продукции. Полученные данные обобщались на уровне как районов, так и отдельных хозяйств, что позволяет получить оценки при различной агрегации данных.

Динамика проведения мониторинга продукции растениеводства показана на рисунке 1. Видно, что наибольшие объемы измерений отмечались в 1986–1993 гг., то есть в период, когда применение защитных мероприятий в сельском хозяйстве было максимальным.

Значимыми были объемы проведения измерений в период внедрения федеральных целевых программ по смягчению последствий Чернобыльской аварии и в 2000–2010 гг. Следует отметить, что длительность проведения мониторинга отдельных видов продукции отличались. Так, отбор проб картофеля и овощей практически прекратился в 2011 г., поскольку средние уровни загрязнения этих видов продукции были в 10 и более раз меньше соответствующих нормативов¹, а превышение нормативов отмечалось только в единичных случаях. Мониторинг содержания ¹³⁷Cs в зерне проводился до 2021 г. и был также остановлен из-за низких уровней содержания этого радионуклида в зерне.

Параметры

Для анализа динамики снижения концентрации ¹³⁷Cs в сельскохозяйственной продукции ($Q(t)$) использовался подход, основанный на оценке эффективных периодов

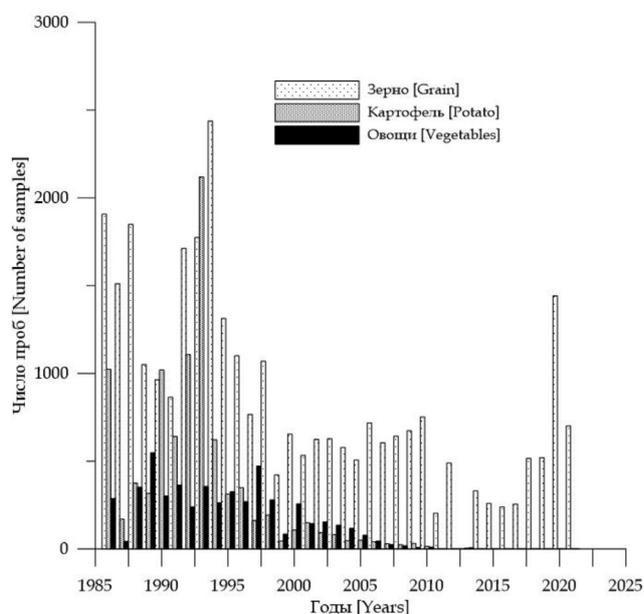


Рис. 1. Объемы отбора проб продукции растениеводства в юго-западных районах Брянской области в 1986–2021 гг.
[Fig. 1. Quantity of crop production samples taken annually in southwestern districts of Bryansk region in 1986–2021]

полуснижения ($T_{1/2}$), то есть периодов времени, в течение которого содержание радионуклидов в выделенных видах продукции под влиянием всех факторов уменьшается в 2 раза [3].

Таким образом, для аппроксимации данных мониторинга в настоящей работе в большинстве случаев использовалась формула:

$$Q(t) = Q(t_k) \times e^{-\lambda_{эфф} \times (t-t_k)}, \lambda_{эфф} = \frac{0,693}{T_{эфф}}$$

где $T_{эфф}$ – эффективный период полуснижения содержания ¹³⁷Cs в сельскохозяйственной продукции (годы); $\lambda_{эфф}$ – постоянная снижения, соответствующая периоду полуснижения $T_{эфф}$ (год⁻¹), t – текущее время (годы), t_k – начальная дата, соответствующая периоду времени, для которого приводятся оценки (годы).

При анализе экспериментальных данных также использовались экологические периоды полуснижения ($T_{эк}$), которые определены как периоды времени, в течение которого содержание радионуклидов в выде-

¹ СанПиН 2.3.2.1078-01, 2002 [SanPiN 2.3.2.1078-01. Food raw materials and food products. Hygienic requirements for safety and nutritional value of food products]; СанПиН 2.3.2.2650-10. Дополнения и изменения № 18 к санитарно-эпидемиологическим правилам и нормативам СанПиН 2.3.2.1078-01 [SanPiN 2.3.2.2650-10. Supplements and Amendments No. 18 to SanPiN 2.3.2.1078-01] (In Russ.).

ленных видах продукции под влиянием всех факторов, за исключением радиоактивного распада, изменяется в 2 раза:

$$T_{\text{эк}} = \frac{T_{\text{эфф}} \times T^{rd}}{T_{\text{эфф}} - T^{rd}}, T^{rd} = \frac{0,693}{\lambda^{rd}},$$

где λ^{rd} – постоянная радиоактивного распада (годы⁻¹), а T^{rd} – период полураспада ¹³⁷Cs.

Отметим, что этот подход использовался для оценки параметров как снижения, так и увеличения содержания радионуклидов в сельскохозяйственной продукции.

Реабилитационные мероприятия

Как отмечено выше, при анализе закономерностей динамики содержания радионуклидов в сельскохозяйственной продукции необходимо учитывать влияние защитных и реабилитационных мероприятий [5, 7]. В рамках национальных программ по преодолению последствий аварии на Чернобыльской АЭС в юго-западных районах Брянской области проводились работы по реабилитации загрязнённых территорий. Особенно интенсивно мероприятия применялись в первые годы после Чернобыльской аварии (рис. 2).

Внесение минеральных удобрений в расчете на гектар пашни в 1986–1990 гг. достигало 257 кг га⁻¹ (по области в целом 209 кг га⁻¹ д.в.²), а в 1991 г. – 252 и 212 кг га⁻¹ соответственно. Под зерновые культуры в эти же годы было внесено до 240 кг га⁻¹ д.в., а под картофель – 386–430 кг га⁻¹ д.в. В этот период в качестве основной защитной меры применяли повышенные дозы калийных удобрений. Дополнительные дозы калийных удобрений составляли: в 1986–1990 гг. по 56 кг га⁻¹ K₂O [4, 12].

Начиная с 1993 г., в хозяйствах загрязнённых районов Брянской и других областей снижались объёмы применения средств химизации и агрономелиоративных мероприя-

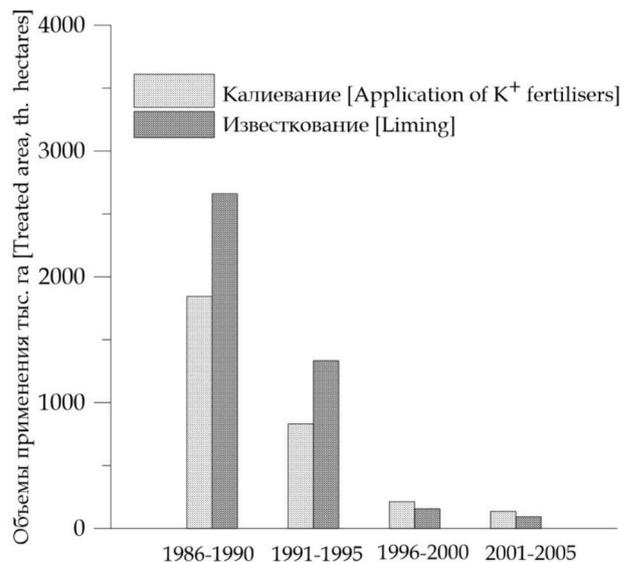


Рис. 2. Масштабы применения мероприятий по снижению содержания ¹³⁷Cs в продукции растениеводства в 1986–2005 гг. [3, 8]

[Fig. 2. Implementation of countermeasures for reduction of ¹³⁷Cs in plant products in 1986–2005 [3, 8]

тий. Применение минеральных удобрений на 1 га пашни и под отдельные культуры по загрязнённым районам уменьшилось в 3–8 раз. В 1995 г. продуктивность пашни резко упала и по загрязнённым районам составила 13,9 ц га⁻¹ кормовых единиц.

После 2006 г. агрохимические мероприятия проводились в рамках Федеральной целевой программы (ФЦП) «Сохранение и восстановление плодородия почв земель сельскохозяйственного назначения и агроландшафтов как национального достояния России на 2006–2013 годы» (табл. 2) [13].

Объёмы агротехнических и агрохимических работ на загрязнённых землях Брянской области, тыс. га [13]

Таблица 2

Annual rates of agrotechnical and agrochemical measures application in the contaminated areas of Bryansk region, thousand hectares [13]

[Table 2

Виды работ [remedial options]	2006	2007	2008	2009	2010	2011	2012	2013
Агротехнические [Agrotechnical]	14,6	11,9	9,4	11,2	9,5	14,5	12,5	8,0
Известкование [Liming]	3,5	2,9	2,2	0,7	1,1	1,4	2,2	1,9
Фосфоритование [Phosphorus application]	2,1	3,6	2,5	-	-	-	0,6	0,6
Калиевание [Potassium application]	5,0	2,3	1,0	1,5	1,5	2,8	2,2	1,7
Итого [Total]	25,2	20,7	15,1	13,4	12,1	18,7	17,5	12,2

² д.в. – действующее вещество, то есть количество элемента питания в удобрении, которое может быть использовано растением.

Проведение этих мероприятий во многих случаях определяло снижение загрязнения продукции, и эффект от их проведения должен учитываться при оценке динамики загрязнения этой продукции после аварии на Чернобыльской АЭС.

Анализ данных

При оценке закономерностей снижения содержания ¹³⁷Cs в продукции использовались данные, количество которых приведено в таблице 1. Для обработки информации использовались статистические методы, предложенные в работе [14]. К каждой выборке (то есть комбинации вид продукции/год) применялся критерий для отбраковки данных, которые впоследствии удалялись. Так как большинство выборок соответствовало логнормальному закону, данные перед отбраковкой логарифмировались, а процедура отбраковки применялась к логарифмам исходных данных. К малым выборкам (менее 25 значений) применялся критерий Диксона, а к более крупным – стандартные критерии [10, 16]. После отбраковки данных для каждой выборки подсчитывалось среднее геометри-

ческое и 95% доверительный интервал. Эффективные периоды полуснижения КП рассчитывались с помощью стандартных методов линейной регрессии [15].

Концентрации ¹³⁷Cs в пробах зерна, картофеля и овощей в 1986 г.

Данные по концентрациям ¹³⁷Cs в рассматриваемых видах сельскохозяйственной продукции приведены в таблице 3. Данные мониторинга были усреднены по хозяйствам, в которых были отобраны пробы в 1986 г. Вследствие определенных ограничений ресурсов в 1986 г. сплошной отбор зерна и картофеля проводился в 75–80% хозяйств, тогда как отбор проб овощей охватил только около 44% хозяйств. Количество измерений, выполненных в 1986 г., составило 1907 проб зерна, 1024 проб картофеля и только 286 проб овощей. Вследствие этого оценки статистических параметров загрязнения продукции для зерна и картофеля в 1986 г. были сделаны на уровне отдельных районов, тогда как для овощей аналогичные оценки были сделаны для 6 районов в целом.

Таблица 3

Параметры распределения средних по хозяйствам концентраций ¹³⁷Cs в пробах зерна, картофеля и овощей, отобранных в юго-западных районах Брянской области в 1986 г., Бк/кг

[Table 3]

Parameters of distribution of mean by farms ¹³⁷Cs concentrations in samples of grain, potatoes and vegetables taken in southwestern districts of Bryansk region in 1986, Bq/kg

Районы [Districts]	Число хозяйств [Number of collective farm]	Среднее [Mean]	Стандартное отклонение [St. Dev]	Геометрическое среднее [G. Mean]	Медиана [Median]	Мин [Min]	Мак [Max]
<i>Зерно [Grain]</i>							
Гордеевский [Gordeyevsky]	12	1224	885	1003	925	370	3254
Злынковский [Zlunkovsky]	10	173	48	173	174	111	280
Климовский [Klimovsky]	16	355	195	352	315	299	465
Клинцовский [Klintsovsky]	16	382	382	7	381	371	395
Красногорский [Krasnogorsky]	16	1601	579	1483	1561	466	2525
Новозыбковский [Novozybkovsky]	18	182	144	154	135	69	698
По 6 районам [For 6 districts]	88	652	683	420	376	69	3254
<i>Картофель [Potato]</i>							
Гордеевский [Gordeyevsky]	12	66.1	41	59.1	54	30	189
Злынковский [Zlunkovsky]	10	104	37	99.8	95	75	666
Климовский [Klimovsky]	25	131	85.8	106	108	27	330
Клинцовский [Klintsovsky]	15	349	179	310	295	143	759
Красногорский [Krasnogorsky]	15	277	51,1	272	270	190	330

Районы [Districts]	Число хозяйств [Number of collective farm]	Среднее [Mean]	Стандартное отклонение [St. Dev]	Геометрическое среднее [G. Mean]	Медиана [Median]	Мин [Min]	Мак [Max]
Новозыбковский [Novozybkovsky]	17	104	25,1	101	100	72	148
По 6 районам [For 6 districts]	94	173	133	133	121	27	759
Овощи [Vegetables]							
По 6 районам [For 6 districts]	56	137	70.3	122	122	37	389

Средние концентрации ^{137}Cs в зерне в хозяйствах варьировали от 69 до 3254 Бк кг⁻¹, в картофеле – от 27 до 759 Бк кг⁻¹ и в овощах от 37 до 389 Бк кг⁻¹. Вариабельность концентраций в отдельных пробах была существенно больше и составила от 37 до 5550 Бк кг⁻¹ для зерна, от 37 до 1443 Бк кг⁻¹ для картофеля и от 37 до 914 Бк кг⁻¹ – для овощей.

Максимальные уровни содержания ^{137}Cs в зерне отмечены в Красногорском и Гордеевском районах, а минимальные – в Новозыбковском и Злынковском районах. Наибольшие уровни содержания ^{137}Cs в картофеле отмечаются в Клинцовском и Красногорском районах (около 300 Бк кг⁻¹), в Злынковском, Новозыбковском и Климовском районах уровни содержания ^{137}Cs находятся в диапазоне 100–130 Бк кг⁻¹, а минимальные уровни характерны для Гордеевского района. При этом следует отметить отсутствие явной зависимости загрязнения зерна и картофеля ^{137}Cs от плотности выпадений (см. табл. 3).

Авария на Чернобыльской АЭС произошла в конце апреля 1986 г. до начала посадок картофеля и овощей и посева яровых ячменя и пшеницы. В то же время следует отметить, что около 70% посевных площадей зерновых в юго-западных районах Брянской области составляли озимые, которые были высеяны осенью 1985 г. Таким образом, пути загрязнения яровых зерновых культур, картофеля и овощей несколько отличались от загрязнения озимой ржи и пшеницы. В первый год после аварии корневое поступление в озимые растения было возможно только из верхнего горизонта почвы, тогда как в яровые и пропашные культуры поступление радионуклидов происходило из всего почвенного горизонта. Таким образом, уровни загрязнения ^{137}Cs зерна озимых культур отличались от уровней загрязнения, характерных для яровых.

Среднее значение содержания ^{137}Cs в зерне в юго-западных районах Брянской области было в 4,8 раза больше, чем в овощах, и в 3,8 раза больше, чем в картофеле. Эти отношения значительно варьируют в зависимости от района и меняются для картофеля от 18,5 для Гордеевского района до 1,1 для Клинцовского района.

Во всех рассмотренных случаях средние значения больше медианы и геометрического среднего, а коэффициент вариации данных варьирует от 0,02 (зерно Клинцовского района) до 0,79 для проб зерна, отобранного в хозяйствах Новозыбковского района, при этом вариабельность данных по содержанию ^{137}Cs в зерне была существенно выше, чем для картофеля и овощей. Такого рода различия вариабельности данных для зерна от вариабельности значений для овощей и картофеля может в числе прочих причин объясняться тем, что выборка

данных для зерна включает зерно как озимых, так и яровых культур, отличающихся механизмами загрязнения конечного урожая.

Динамика содержания ^{137}Cs в продукции растениеводства

Данные по динамике изменения ^{137}Cs в зерне, картофеле и овощах представлены на рисунках 3–5. Для количественного сравнения динамики содержания ^{137}Cs в рассматриваемых видах сельскохозяйственной продукции на рисунках 3–5 представлены периоды полуснижения концентраций радионуклида в первый период после аварии (с 1987 до 1990 г.), восстановительный период (с 1991 по 2010 г.) и третий, отдаленный период, в качестве которого рассматривался интервал времени после 2010 г. Верхний индекс, указанный в периодах полуснижения на рисунках 3–5, соответствует номеру периода. Для сравнения на рисунках 3–5 показано снижение содержания ^{137}Cs в продукции в предположении, что оно определялось только радиоактивным распадом.

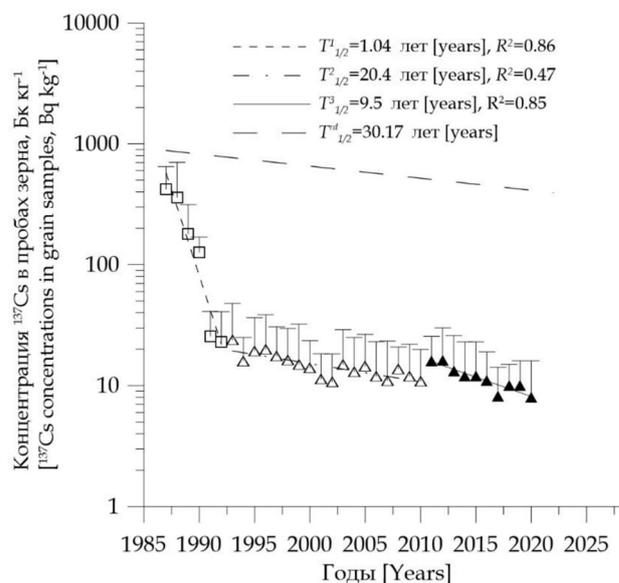


Рис. 3. Динамика снижения концентрации ^{137}Cs в зерне юго-западных районов Брянской области после аварии на Чернобыльской АЭС. Данные, соответствующие выделенным периодам после аварии, представлены разными символами [Fig. 3. Dynamics of ^{137}Cs concentrations in grain produced in southwestern districts of Bryansk region after the Chernobyl accident. Data corresponding to different periods after the accident are represented by different symbols]

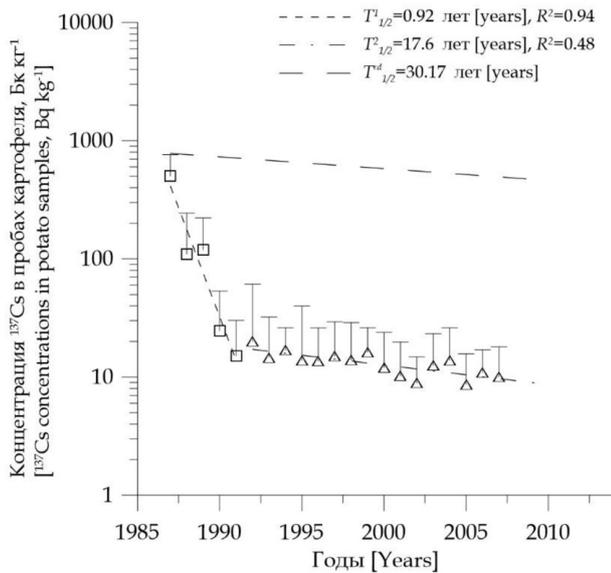


Рис. 4. Динамика снижения содержания ^{137}Cs в картофеле, производимом в юго-западных районах Брянской области после аварии на Чернобыльской АЭС. Данные, соответствующие выделенным периодам после аварии, представлены разными символами

[Fig. 4. Dynamics of ^{137}Cs concentrations in potato produced in southwestern districts of Bryansk region after the Chernobyl accident. Data corresponding to different periods after the accident are represented by different symbols]

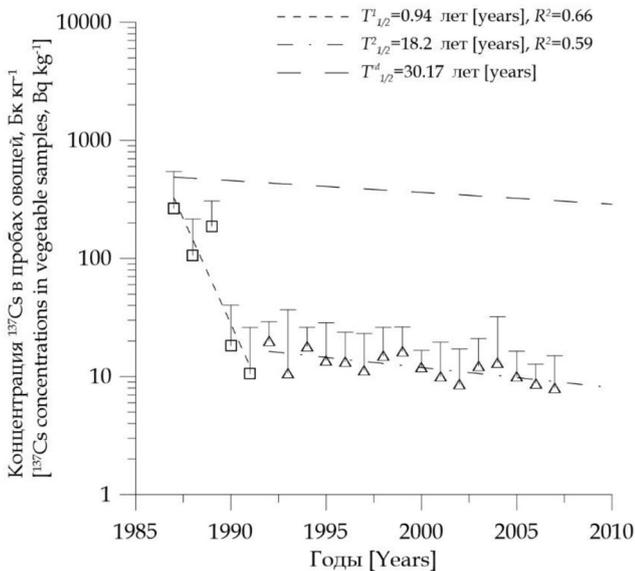


Рис. 5. Динамика снижения содержания ^{137}Cs в овощах, производимых в юго-западных районах Брянской области после аварии на Чернобыльской АЭС. Данные, соответствующие выделенным периодам после аварии, представлены разными символами

[Fig. 5. Dynamics of ^{137}Cs concentrations in vegetables produced in southwestern districts of Bryansk region after the Chernobyl accident. Data corresponding to different periods after the accident are represented by different symbols]

Видно, что динамика снижения концентраций ^{137}Cs как в зерне, так и в картофеле и овощах носила неравномерный характер. При этом можно выделить 2 или 3 (для зерна) периода, когда темпы снижения этого радионуклида в про-

дукции существенно отличались. Данные этих рисунков также иллюстрируют различия в интенсивности снижения загрязнения продукции в различные периоды времени после аварии ($T^1_{1/2}$, $T^2_{1/2}$ и $T^3_{1/2}$) и уменьшения содержания ^{137}Cs продукции только вследствие радиоактивного распада ($T^d_{1/2}$). Из приведенных рисунков видно, что за 35 лет после Чернобыльской аварии содержание ^{137}Cs в продукции растениеводства уменьшилось в 30–50 раз (по сравнению с 1987 г.). Вклад радиоактивного распада в снижение загрязнения продукции был существенно меньше вклада других факторов, таких как проведение защитных мероприятий и сорбция цезия в почвенно-поглощающем слое почвы, не превышая нескольких процентов от общего снижения.

Активное проведение мероприятий, таких как известкование кислых почв и внесение повышенных доз минеральных удобрений, способствовало быстрому снижению загрязнения продукции растениеводства в период времени с 1987 до 1990 г. Другим фактором, обуславливающим уменьшение содержания продукции в этот период, было естественное снижение содержания ^{137}Cs за счет сорбции этого радионуклида почвенно-поглощающим комплексом почв. Для этого интервала времени характерны самые короткие периоды полуснижения содержания этого радионуклида в продукции – от 0,92 (картофель) до 1,04 года (зерно). Периоды полуснижения ^{137}Cs в этих видах продукции, рассчитанные для территорий, где мероприятия не проводились, были в 2–3 длиннее [2].

Начиная с 4-го года после аварии, ухудшение экономического состояния хозяйств не позволило выполнить необходимые защитные мероприятия, что приводило к снижению плодородия почв до уровня, который соответствовал более низкому агрофону [4, 13]. Так, в Новозыбковском районе при недостатке внесения калийных удобрений под зерновые культуры и картофель содержание ^{137}Cs в продукции в 1995–1996 гг. увеличилось более чем в 1,5–2 раза по сравнению с периодом, когда они применялись в оптимальных объемах для снижения загрязнения продукции (1991–1992 гг.) [8, 9]. Внедрение мероприятий ФЦП «Сохранение и восстановление плодородия почв земель сельскохозяйственного назначения и агроландшафтов как национального достояния России на 2006–2013 годы» позволило в определенной степени нивелировать снижение плодородия почв.

В последующем, начиная с 2011 г., динамика загрязнения продукции определялась разнонаправленными процессами, то есть увеличением поступления ^{137}Cs в растения в результате снижения плодородия почв, которое компенсировалось естественным снижением биологической доступности радионуклидов в почвах под действием геохимических процессов, часто называемых в литературе «старением цезия». В результате этих процессов снижения содержания радионуклидов в продукции сильно замедлилось, а период полуснижения, в зависимости от вида продукции, составил 17,8 года для овощей, 18,2 для картофеля и 20,4 для зерна.

Периоды наблюдений для картофеля и овощей включали только 2 временных интервала, в пределах которых периоды полуснижения отличались. Анализ информации по содержанию ^{137}Cs в зерне выполнен на основе данных мониторинга, который проводился до 2021 г., что позволило выделить еще 1 период полуснижения, равный 9,5 года.

Периоды полуснижения содержания ¹³⁷Cs в продукции растениеводства

Недостаток данных по содержанию ¹³⁷Cs в овощах не позволяет оценить периоды полуснижения содержания этого радионуклида на уровне отдельных районов. Вследствие этого в таблице 4 представлены эффективные периоды полуснижения содержания ¹³⁷Cs только в зерне и картофеле.

Как уже отмечалось, динамика изменения содержания ¹³⁷Cs как в зерне, так и в картофеле носила ярко выраженный неоднородный характер. Данные для зерна позволяют выделить 3 периода, динамика в пределах каждого из которых довольно близка, а периоды полуснижения между которыми статистически различны (см. рис. 3). К ним можно отнести периоды времени с 1987 по 1990 г., с 1991 по 2010 г. и с 2011 по 2021 г. Первый период охватывает промежуток времени, когда агрохимические мероприятия применялись в постоянно увеличивающихся масштабах. Второй период включает промежуток времени, когда объемы проведения защитных мероприятий сокращались, а их проведение ограничивалось проведением в относительно небольшом числе «критических» хозяйств. В

третий период эффект от проведения мероприятий был практически нивелирован, а снижение загрязнения продукции определялось главным образом естественным снижением биологической доступности ¹³⁷Cs в почве и радиоактивным распадом.

Первый период полуснижения содержания ¹³⁷Cs в зерне (1987–1990 гг.) находится в диапазоне от 0,8 до 1,3 года (за исключением Злынковского района), при высоких значениях R² (0,89–0,99). В Стародубском районе проведение мониторинга продукции растениеводства было начато в 1993 г., что не позволило оценить первый период полуснижения. Снижение содержания ¹³⁷Cs в зерне замедлилось во всех районах после 1991 г., а периоды полуснижения (с 1991 по 2011 г.) находятся в диапазоне от 17,8 (Стародубский район) до 265 лет (Клинцовский район). Отметим, что в последнем случае наблюдаемого снижения содержания цезия практически не отмечается, а среднегеометрические значения концентрации ¹³⁷Cs в зерне варьируют от 5 до 12 Бк кг⁻¹ со средним геометрическим значением 7,9 Бк кг⁻¹. Экологические периоды полуснижения незначительно отличаются от эффективных для 1987–1990 гг. (первого периода) и значитель-

Таблица 4

Эффективные периоды полуснижения содержания ¹³⁷Cs в пробах зерна и картофеля, отобранных в юго-западных районах Брянской области в 1987–2021 гг.

[Table 4

Effective half-lives of ¹³⁷Cs concentrations in grain and potato samples taken in the southwestern districts of the Bryansk region in 1987–2020]

Районы [Districts]	T ¹ _{1/2'} лет [years]	R ²	T ² _{1/2'} лет [years]	R ²	T ³ _{1/2'} лет [years]	R ²
<i>Зерно [Grain]</i>						
Гордеевский [Gordeyevsky]	1,2(1,3) ¹	0,96	-29,4(1152)	0,04	12,4 (21,1)	0,63
Злынковский [Zlunkovsky]	1,3(1,4)	0,19	21,0(69)	0,30	-11,9 ² (-8,4)	0,68
Климовский [Klimovsky]	0,9(0,93)	0,98	19,8(58)	0,47	10,5 (16,1)	0,71
Клинцовский [Klintsovsky]	0,7(0,72)	0,95	265(-34,1)	0,02	4,8 (5,7)	0,93
Красногорский [Krasnogorsky]	0,8(0,82)	0,94	24,1(63,0)	0,45	-31,1 (-29)	0,08
Новозыбковский [Novozybkovsky]	0,8(0,82)	0,89	57,5(-63,5)	0,13	10,5 (16,1)	0,94
Стародубский [Starodubsky]	-	-	17,8 (43,4)	0,17	11(17,3)	0,63
<i>Картофель [Potato]</i>						
Гордеевский [Gordeyevsky]	1,1 (1,2)	0,90	16,9(38,4)	0,34	-	-
Злынковский [Zlunkovsky]	0,76 (0,78)	0,95	-16,1(-10,5)	0,63	-	-
Климовский [Klimovsky]	0,95 (0,98)	0,96	26,7(232,1)	0,29	-	-
Клинцовский [Klintsovsky]	0,86 (0,89)	0,99	19,8 (57,6)	0,43	-	-
Красногорский [Krasnogorsky]	1,6 (1,69)	0,72	10,5 (18,1)	0,59	-	-
Новозыбковский [Novozybkovsky]	1,64 (1,73)	0,91	12,4 (21,5)	0,49	-	-

¹ – в скобках приводятся экологические периоды полуснижения содержания ¹³⁷Cs в продукции [ecological half-life values of ¹³⁷Cs concentrations in agricultural products are given in parentheses]

² – знак “-” перед эффективным периодом полуснижения означает, что полупериод соответствует росту содержания ¹³⁷Cs в продукции [sign “-” before the effective half-life means that the half-life corresponds to an increase in the ¹³⁷Cs concentration in the products]

но отличаются для второго (1991–2011 гг.) и третьего (2011–2021 гг.) периодов. В первую очередь, это объясняется тем, что первые периоды намного короче периода полураспада ^{137}Cs – 30,17 лет, вследствие чего снижение концентрации этого радионуклида в сельскохозяйственной продукции практически полностью определяется быстрой сорбцией радионуклида в почве и защитными мероприятиями.

В течение второго периода сорбция радионуклидов протекает существенно медленнее, а прекращение защитных мероприятий также приводит к замедлению снижения или даже к росту загрязнения продукции (рис. 6).

В этот период времени особое значение приобретает зависимость поступления радионуклидов от погодных условий. Известно, что в зависимости от погодных условий конкретного года коэффициенты перехода из почвы в растения могут изменяться до 5 раз [4]. Этим во многом объясняется высокая вариабельность концентраций ^{137}Cs в продукции в условиях, когда влияние других факторов незначительно либо они компенсируют друг друга.

Начиная с 2011 г., динамика содержания ^{137}Cs в зерне определялась в основном влиянием естественных геохимических процессов в почве и радиоактивным распадом. Характер изменения содержания ^{137}Cs в зерне различных районов в период с 2011 до 2021 г. отличался в зависимости от особенностей проведения мероприятий в этих районах в предыдущие периоды. Так, в Гордеевском, Климовском и Новозыбковском районах отмечалось умеренное снижение, существенный спад отмечен в Клинцовском районе. В Злынковском и Красногорском районах в этот же период наблюдался рост загрязнения продукции, связанный с существенным падением плодородия почв [13].

Для оценки параметров естественного снижения концентраций ^{137}Cs в зерне данные 2011–2021 гг. были экстраполированы к 1987 г., то есть к первому году, когда все

пахотные угодья, подвергшиеся загрязнению, были перепаханы (см. рис. 6). При этом учитывалось, что естественное снижение биологической доступности ^{137}Cs в почве также носит неравномерный характер и наиболее быстро протекает в первый период после поступления «свежего» ^{137}Cs в почвенный раствор. Полученные результаты показывают, что оцененные таким образом эффективные периоды полуснижения находятся в диапазоне от 8,2 до 13,5 лет, а экологические периоды полуснижения – от 13 до 19,8 лет. Отметим, что эти оценки хорошо согласуются со средним эффективным периодом полуснижения, рассчитанным для 6 районов, находящихся в зоне интенсивного загрязнения. Следует также отметить, что периоды полуснижения достаточно хорошо согласуются с результатами предыдущих исследований [17, 18], а также с данными работ, выполненными в других регионах Европы после аварии на Чернобыльской АЭС.

Первые эффективные периоды полуснижения содержания ^{137}Cs в картофеле варьируют в зависимости от особенностей проведения защитных мероприятий и характеристик почвы в отдельных районах от 0,76 до 1,64 года, а вторые – от 10,5 до 26,7 лет. Следует отметить динамику содержания этого радионуклида в картофеле в Злынковском районе, где после весьма быстрого и сильного снижения концентраций ^{137}Cs в картофеле после 1994 г. отмечен медленный рост содержаний ^{137}Cs с периодом 16 лет, что объясняется недостаточной компенсацией снижения агрофона геохимическим связыванием ^{137}Cs в почве (рис. 7).

Заключение

Анализ данных по закономерностям изменения содержания ^{137}Cs в продукции растениеводства показывает, что снижение концентрации этого радионуклида в юго-западных районах Брянской области как в зерне, так и в картофеле и овощах во многом определялось динамикой прове-

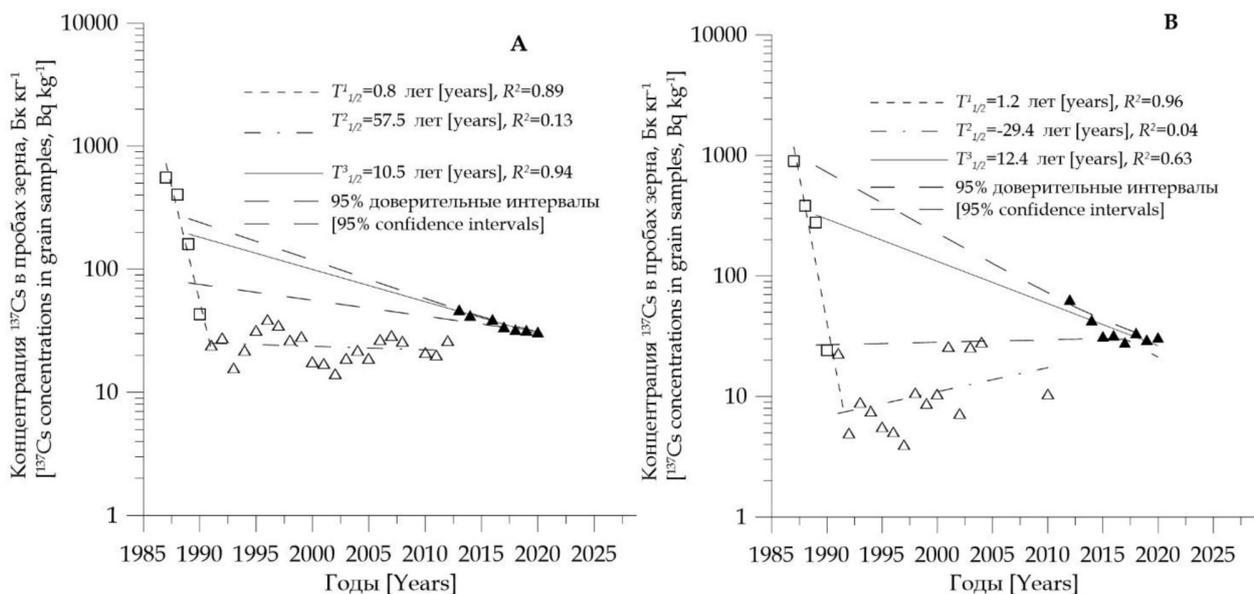


Рис. 6. Динамика снижения содержания ^{137}Cs в зерне Новозыбковского (А) и Гордеевского (В) районов Брянской области.

95% доверительные интервалы показаны прерывистой линией

[Fig. 6. Dynamics of ^{137}Cs concentrations in grain produced in Novozybkovsky (A) and Gordeyevsky (B) districts of Bryansk region. 95% confidence intervals are shown by the dashed line]

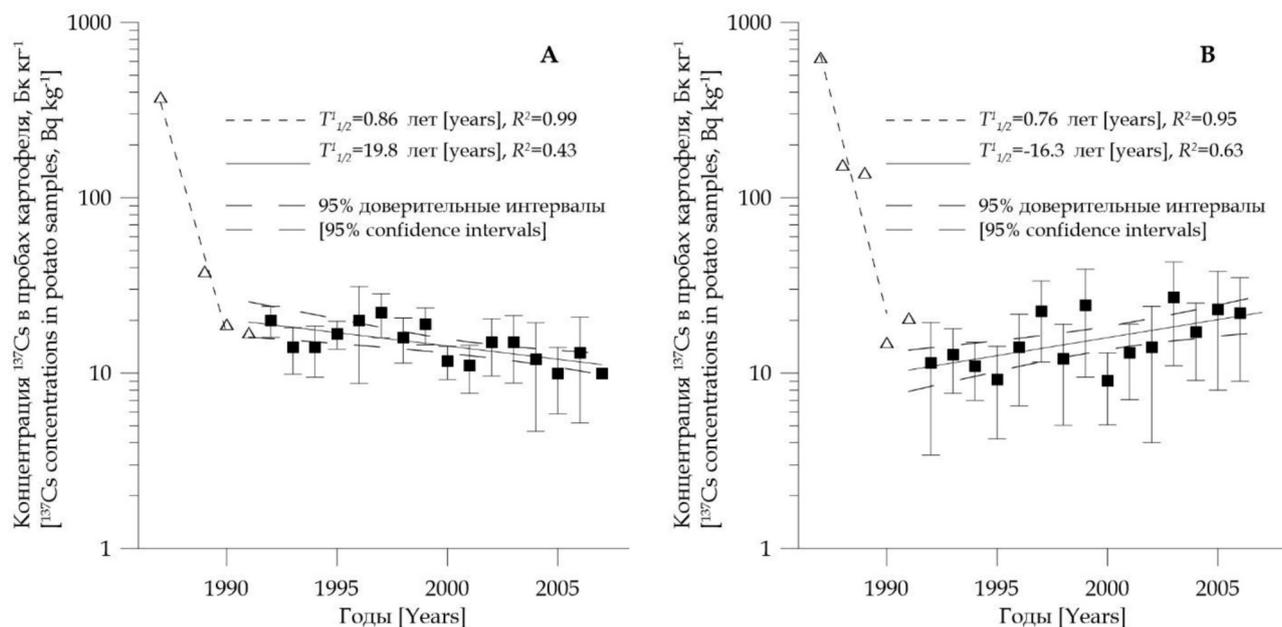


Рис. 7. Динамика снижения содержания ^{137}Cs в картофеле, производимом в Клиновском (А) и Злынковском (В) районах Брянской области

[Fig. 7. Dynamics of ^{137}Cs concentration reduction in potatoes produced in Klintsovsky (A) and Zlunkovsky (B) districts of the Bryansk region]

дения агрохимических защитных мероприятий. Поскольку на поступление ^{137}Cs в растения существенное влияние также оказывали погодные условия, «старение» ^{137}Cs в почве и радиоактивный распад, прогнозирование загрязнения продукции после радиоактивных выпадений является нетривиальной и многофакторной задачей. Вследствие этого при использовании параметров снижения содержания ^{137}Cs в зерновых и пропашных культурах необходимо учитывать историю проведения агрохимических мероприятий и плодородие почв, то есть специфику загрязненных сельскохозяйственных угодий. Представленные данные содержат параметры снижения содержания ^{137}Cs в продукции растениеводства: зерне, картофеле и овощах с учетом конкретных особенностей районов, пострадавших после аварии на Чернобыльской АЭС, позволяя выработать эффективные стратегии перехода к нормальным условиям жизнедеятельности в этих районах.

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, связанных с точностью или целостностью любой части работы.

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

Емлютина Е.С. – обработка, анализ и интерпретация данных; согласие нести ответственность за все аспекты статьи, обеспечивая надлежащее расследование и

решение вопросов, связанных с точностью любой части работы.

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

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

Благодарности

Данные исследования выполнены при поддержке Министерства науки и высшего образования Российской Федерации. Авторы выражают свою признательность рецензентам.

Информация о конфликте интересов

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

Литература

1. Алексахин Р.М. Радиоэкологические уроки Чернобыля // Радиационная биология. Радиоэкология. 1993. Т. 33, № 1. С. 3–14.
2. Fesenko S.V., Alexakhin R.M., Sanzharova N.I., Spiridonov S.I. Dynamics of ^{137}Cs concentration in agricultural products in areas of Russia contaminated as a result of the accident at the Chernobyl nuclear power plant // Radiation Protection Dosimetry. 1995. Vol. 60, No 2. P. 155–166.
3. 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.

4. Радиоэкологические последствия аварии на Чернобыльской АЭС: биологические эффекты, миграция, реабилитация загрязненных территорий: Монография / Под ред. Санжаровой Н.И., Фесенко С.В. М.: РАН, 2018. 278 с. URL: <https://riiae.ru/index.php/deyatelnost/publikatsii-fgbnu-vniirae/444-osnovnye-nauchnye-publikatsii-sotrudnikov-fgbnu-vniirae-v-2018-g> (Дата обращения: 05.07.2022).
5. 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.
6. 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.
7. 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.
8. Fesenko S.V., Alexakhin R.M., Balonov M.I., et al. An extended critical review of twenty years of countermeasures used in agriculture after the Chernobyl accident, 2007 // *Science of the Total Environment*. 2007. Vol. 383. P. 1-24.
9. IAEA, 2006. International Atomic Energy Agency. Environmental Consequences of the Chernobyl Accident and Their Remediation: Twenty Years of Experience. Report of the UN Chernobyl Forum Expert Group "Environment" (EGE). International Atomic Energy Agency, Vienna, IAEA, 2009.
10. Справочник по радиационной обстановке и дозам облучения, полученным в 1991 году населением территорий Российской Федерации, подвергшихся радиоактивному загрязнению в результате аварии на Чернобыльской АЭС / под ред. Балонова М.И. СПб: Издательство «Ариадна – Аркадия», 1993.
11. Справочник по радиационно-гигиенической ситуации на территориях, подвергшихся радиоактивному загрязнению в ходе аварии на Чернобыльской АЭС, Москва. 1997. 160 с.
12. Маркина З.Н., Курганов А.А., Воробьев Г.Т. Радиоактивное загрязнение продукции растениеводства Брянской области. Брянский Центр «Агрохимрадиология». Брянск 1997. 242 с.
13. Прудников П.В. Использование агрономических руд и новых комплексных минеральных удобрений на радиоактивно загрязненных почвах. ФГБУ Центр химизации и сельскохозяйственной радиологии «Брянский» Брянск, 2012.
14. 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.
15. Айвазян С.А., Енюков И.С., Мешалкин Л.Д. Прикладная статистика. Основы моделирования и первичная обработка данных. М., 1983.
16. Закс Л. Статистическое оценивание. М., 1976.
17. Fesenko S.V., Colgan P.A., Sanzharova N.I., et al. The dynamics of the transfer of caesium-137 to animal fodder in areas of Russia affected by the Chernobyl accident and resulting doses from the consumption of milk and milk products // *Radiation Protection Dosimetry*. 1997. Vol. 69, No 4. P. 289-299.
18. Fesenko S.V., Alexakhin R.M., Spiridonov S.I., Sanzharova N.I. Dynamics of ¹³⁷Cs concentration in agricultural products in areas of Russia subjected to contamination after the accident at the Chernobyl nuclear power plant // *Radiation Protection Dosimetry*. 1995. Vol. 60, No 2. P. 155-166.
19. Pröhl G., Ehlken 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.

Поступила: 05.07.2022 г.

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

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

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

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

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

Для цитирования: Фесенко С.В., Прудников П.В., Емлютина Е.С., Епифанова И.Э., Шубина О.А. 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

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

Sergey V. Fesenko¹, Petr V. Prudnikov², Evgenia S. Emlyutina¹, Irina E. Epifanova¹, Olga A. Shubina¹

¹Russian Institute of Radiology and Agroecology, Obninsk, Russia

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

The purpose of the study was to analyze the regularities of ^{137}Cs concentrations in grain, potatoes and vegetables in the areas affected the Chernobyl accident. The data describing the countermeasures in the southwestern districts of the Bryansk region are given. The system of radiological monitoring of plant products is described and the relevant data are presented. Dynamics of concentrations both in grain and in potatoes and vegetables had a pronounced heterogeneous character. Reduction of ^{137}Cs concentration in crop production (grain, potato, and vegetables) was determined by the dynamics of agrochemical countermeasures in the contaminated areas, sorption of ^{137}Cs in soil and radioactive decay. It has been revealed that effective half-lives of ^{137}Cs in the above products during intensive implementation of rehabilitation measures (1987-1990) varied within the range from 0,7 up to 1,3 years. Subsequently, in 1991-2011, the decrease of contamination of products slowed down, and in some areas with intensive application of protective measures a certain increase of ^{137}Cs content in products was noted. Effective half-lives during that period ranged 10.5-29 years depending on the peculiarities of application of countermeasures and soil characteristics. The pattern of the ^{137}Cs concentrations in the grain produced in different districts from 2011 to 2021 also differed depending on the history of the countermeasures' application in those districts in the previous periods. The estimation of the effective half-life, equal to 18.2 years, for predicting the reduction of plant product contamination in the long term after the Chernobyl accident has been suggested.

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

Information about authors' personal contribution to the work on the article

Fesenko S.V. – definition of the research concept; analyses and interpretation the data; writing or editing the paper; approving the final version of the paper for publication; agreeing to be responsible for all aspects of the paper, ensuring that proper investigation and resolution of issues related to the accuracy or integrity of any part of the paper.

Prudnikov P.V. – collecting, analyses and interpretation of the data; agreeing to be responsible for all aspects of the article, ensuring that any part of the work is properly investigated and resolved for accuracy.

Emlyutina E.S. – processing, analyses and interpretation of the data; agreeing to be responsible for all aspects of the article, ensuring that the accuracy of any part of the work is properly investigated and addressed.

Epifanova I.E. – processing, analyses and interpretation of the data; agreeing to be responsible for all aspects of the article, ensuring that the accuracy or integrity of any part of the work is properly investigated and addressed.

Shubina O.A. – analyses and interpretation of the data; editing the text of the paper; approving the final version of the paper for publication; taking responsibility for all aspects of the paper, ensuring proper investigating and addressing the accuracy or integrity of any part of the work.

Acknowledgements

This research was supported by the Ministry of Science and Higher Education of the Russian Federation. The authors express their gratitude to the reviewers.

Conflict of interest

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

References

1. Alexakhin RM. Radioecological Lessons of Chernobyl. *Radiation Biology. Radioecology*. 1993;33(1): 3-14. (In Russian).
2. 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.
3. Alexakhin RM, Fesenko SV, Sanzharova NI. Serious radiation accidents and the radiological impact on agriculture. *Radiation Protection Dosimetry*. 1996;64: 37-42.
4. Radioecological consequences of the Chernobyl accident: biological effects, migration, rehabilitation of contaminated areas: Monograph Edited by Sanzharova N.I. and Fesenko S.V. Moscow: RAS; 2018. 278 p. – Available from: <https://rirae.ru/index.php/deyatelnost/publikatsii-fgbnu-vniirae/444-osnovnye-nauchnye-publikatsii-sotrudnikov-fgbnu-vniirae-v-2018-g> (Accessed July 05, 2022) (In Russian).

Sergey V. Fesenko

Russian Institute of Radiology and Agroecology

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

5. 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.
6. 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.
7. 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.
8. Fesenko SV, Alexakhin RM, Balonov MI, Bogdevitch IM, Howard BJ, Kashparov VA, et al. An extended critical review of twenty years of countermeasures used in agriculture after the Chernobyl accident. *Science of the Total Environment*. 2007;383: 1-24.
9. IAEA, 2006. International Atomic Energy Agency. Environmental Consequences of the Chernobyl Accident and Their Remediation: Twenty Years of Experience. Report of the UN Chernobyl Forum Expert Group "Environment" (EGE). International Atomic Energy Agency, Vienna. IAEA, 2009. 166 p.
10. Handbook on Radiation Situation and Doses of Exposure Received in 1991 by Population of Russian Federation Territories Subjected to Radioactive Contamination as a Result of Chernobyl Accident. Ed. Balonov M.I. St. Petersburg: Ariadna-Arkadia Publishing House; 1993. (In Russian).
11. Handbook on the Radiation and Hygienic Situation in Areas Affected by Radioactive Contamination after the Chernobyl Accident. Moscow; 1997. 160 p. (In Russian).
12. Markina ZN, Kurganov AA, Vorobyov GT. Radioactive contamination of crop production in Bryansk Region. Bryansk Center "Agrokhimradiology", Bryansk; 1997: 242 p. (In Russian).
13. Prudnikov PV. The use of agronomic ores and new complex mineral fertilizers on radioactively contaminated soils. Bryansk, FGBU Center of Chemicalization and Agricultural Radiology "Bryansk"; 2012: 232 p. (In Russian).
14. Geraskin SA, Fesenko SV, Chernyaeva LG, Sanzharova NI. Statistical methods of analysis of empirical distributions of radionuclide accumulation factors by plants. *Agricultural Biology*; 1991(1): 130-137. (In Russian).
15. Ayvazyan SA, Enyukov IS, Meshalkin LD. Applied statistics. Fundamentals of modeling and primary data processing. Moscow: Nauka; 1983. (In Russian).
16. Zaks L. Statistical estimation. Moscow: Nauka; 1976. (In Russian).
17. Fesenko SV, Colgan PA, Sanzharova NI, Lissianki KB, Vazquez C, Guardans R. The dynamics of the transfer of caesium-137 to animal fodder in areas of Russia affected by the Chernobyl accident and resulting doses from the consumption of milk and milk products. *Radiation Protection Dosimetry*. 1997;69(4): 289-299.
18. Fesenko SV, Alexakhin RM, Spiridonov SI, Sanzharova NI. Dynamics of ¹³⁷Cs concentration in agricultural products in areas of Russia subjected to contamination after the accident at the Chernobyl nuclear power plant. *Radiation Protection Dosimetry*. 1995;60(2): 155-166.
19. Pröhl G, Ehlken S, Fiedler I, Kirchner G, Klemm E, Zibold G. Ecological half-lives of ⁹⁰Sr and ¹³⁷Cs in terrestrial and aquatic ecosystems. *Journal of Environmental Radioactivity*. 2006;91(1-2): 41-72.

Received: July 05, 2022

For correspondence: Sergey V. Fesenko – principal scientist of Russian Institute of Radiology and Agroecology (Kievskoye shosse, 109 km, Obninsk, 249032 Kaluga region, Russia; E-mail: Corwin_17F@mail.ru)

Petr V. Prudnikov – Director of Bryansk Center of Agrokhimradiologia, Michurinskiy settlement, Bryansk Region, Russia

Evgenia S. Emlyutina – scientist of Russian Institute of Radiology and Agroecology, Obninsk, Russia

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

Olga A. Shubina – deputy director of Russian Institute of Radiology and Agroecology, Obninsk, Russia

For citation: Fesenko S.V., Prudnikov P.V., Emlyutina E.S., Epifanova I.E., Shubina O.A. Dynamics of ¹³⁷Cs concentrations in agricultural products after the Chernobyl accident: cereals, potato, and vegetables. *Radiatsionnaya Gygiena=Radiation Hygiene*. 2022. Vol. 15, No. 4. P. 45-57. (In Russian). DOI: 10.21514/1998-426X-2022-15-4-45-57