

ИЗУЧЕНИЕ ПОСЛЕДСТВИЙ АВАРИИ НА ЧЕРНОБЫЛЬСКОЙ АЭС. К 35-ЛЕТИЮ КАТАСТРОФЫ

УДК 631.95:539.163:614.73:614.876

АВАРИЯ НА ЧЕРНОБЫЛЬСКОЙ АЭС: ЗАЩИТНЫЕ И РЕАБИЛИТАЦИОННЫЕ МЕРОПРИЯТИЯ В СЕЛЬСКОМ ХОЗЯЙСТВЕ

© 2021 г. С. В. Фесенко^{1,*}, Н. И. Санжарова¹, Н. Н. Исамов¹, О. А. Шубина¹

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

*E-mail: corwin_17f@mail.ru

Поступила в редакцию 11.01.2021 г.

После доработки 22.01.2021 г.

Принята к публикации 24.02.2021 г.

Для смягчения последствий Чернобыльской аварии был использован широкий спектр защитных и реабилитационных мероприятий. В настоящей статье обобщена основная информация о применении контрмер в сельском хозяйстве за 35 лет после аварии и приводятся данные об их эффективности. Проанализирован опыт применения сельскохозяйственных реабилитационных мероприятий и их влияние на изменение радиологической ситуации в различные периоды после аварии. Выделены наиболее важные аспекты и показана необходимость использования полученного опыта для разработки систем реагирования в сельском хозяйстве после возможных аварийных ситуаций.

Ключевые слова: Чернобыльская АЭС, сельское хозяйство, последствия, контрмеры, реабилитация, облучение населения

DOI: 10.31857/S086980312103005X

Авария на Чернобыльской АЭС является самой серьезной радиационной аварией за всю историю развития ядерной энергетики. Загрязнению подверглась значительная территория, при этом на площади более 150 000 км² плотность загрязнения ¹³⁷Cs была выше 37 кБк/м² [1]. Чернобыльская АЭС (ЧАЭС) находится в районе интенсивного ведения сельского хозяйства, поэтому авария оказала чрезвычайно серьезное воздействие на экономику и население сельских районов трех наиболее сильно загрязненных стран – Украины, Беларуси и России. Высокие плотности загрязнения определили необходимость прекращения или ограничения производства сельскохозяйственной продукции на значительной территории. Аварийный выброс включал экологически подвижные радионуклиды, в том числе изотопы радиоактивного йода, радиоактивного стронция и радиоактивного цезия, два из которых (⁹⁰Sr и ¹³⁷Cs) имеют достаточно длительные периоды полураспада (29.1 и 30.2 года соответственно) для того, чтобы оказать долгосрочное воздействие на сельское хозяйство.

Характерной особенностью пострадавших районов является преобладание низкоплодородных песчаных и торфяных почв, характеризующихся высоким переходом радиоактивного цезия в растения, а далее в продукцию животноводства. Поскольку авария произошла во второй половине весеннего сезона, воздействие аварии на сель-

ское хозяйство было серьезным, так как сельскохозяйственные животные находились на выпасе, а незагрязненные запасы кормов, в качестве альтернативы зеленым кормам, практически отсутствовали. Потребление загрязненных продуктов питания было и остается одним из ведущих путей формирования доз облучения населения в пострадавших районах [2–8].

Радиоцезий являлся основным дозообразующим радионуклидом в зоне аварии на Чернобыльской АЭС, за исключением короткого периода непосредственно после аварии, когда основную роль играли коротко- и среднеживущие радионуклиды. Только в части 30-километровой зоны вокруг Чернобыльской АЭС, где хозяйственная деятельность была прекращена, а также на небольшой территории за ее пределами (Иванковский район, Украина и Хойникский район, Белоруссия) ⁹⁰Sr имел и имеет достаточно важное значение для обеспечения безопасного ведения сельского хозяйства [7, 11, 12]. Поэтому оценки радиологических последствий аварийных выбросов из Чернобыльской АЭС, а также планирование и осуществление контрмер основывались на информации о концентрациях ¹³⁷Cs в окружающей среде и тенденциях в ее изменении. Тем не менее были разработаны и применялись некоторые защитные мероприятия для снижения поступления ⁹⁰Sr в продукцию и было достигнуто 2–4-кратное снижение ⁹⁰Sr в траве и примерно 2-кратное сниже-

ние содержания ^{90}Sr в зерне после коренного улучшения кормовых угодий и применения минеральных удобрений соответственно [10].

Комплекс указанных факторов определил тяжесть последствий аварии, а также важность проведения сельскохозяйственных мероприятий как одного из основных элементов стратегии реагирования и реабилитации пострадавших регионов. Защитные мероприятия применялись во всех отраслях агропромышленного комплекса: от ведения растениеводства и животноводства до переработки сельскохозяйственной и пищевой продукции.

Учитывая экономические и социальные ограничения, характерные для начала 90-х годов прошлого века, основной задачей защитных мероприятий после аварии было сохранение потенциала сельскохозяйственного производства с учетом соответствующих допустимых уровней загрязнения и требований к радиационной защите населения. Эта задача также имела важное значение для сохранения социальной и психологической стабильности сельского населения, поскольку производство безопасных продуктов питания снижало уровень стресса у населения, проживающего на пострадавших территориях [11].

За последние годы было проведено много обзоров применения защитных и реабилитационных мероприятий в сельском хозяйстве [10–17]. Целью настоящей статьи является критический анализ эффективности защитных и реабилитационных мероприятий, проведенных в пострадавших регионах после аварии на Чернобыльской АЭС, и их влияния на смягчение последствий аварии для сельского хозяйства и сельского населения.

ЗОНИРОВАНИЕ ЗАГРЯЗНЕННЫХ ТЕРРИТОРИЙ

Основой для организации и ведения сельскохозяйственного производства во все периоды после аварии является выделение территорий (районов), которые будут считаться загрязненными. Базируясь на предварительных знаниях о поведении радионуклидов, внешняя демаркация “загрязненного” района была установлена по плотности загрязнения ^{137}Cs 1 Ки/км^2 (37 кБк/м^2) [1, 9]. Территории с плотностью загрязнения менее 37 кБк/м^2 официально считались “незагрязненными”. На основе этой градации загрязненные районы составляли 3.2% территории европейской части СССР.

Пять областей Беларуси, 22 области России и 12 областей Украины были официально признаны загрязненными регионами после аварии на ЧАЭС. Большое число регионов в России в определенной степени отражает размер страны в соче-

тании с политикой включения даже тех из них, где были выявлены незначительные территории с плотностью по ^{137}Cs выше 37 кБк/м^2 . Наиболее высокие уровни загрязнения сельскохозяйственных угодий были выделены в трех областях Беларуси (Гомельская, Могилевская и Брестская), пяти областях Украины (Киевская, Житомирская, Ровенская, Волынская и Черниговская) и четырех областях России (Брянская, Калужская, Тульская и Орловская). Более 15000 населенных пунктов с населением около 6 млн человек были локализованы в районах с плотностью загрязнения ^{137}Cs выше 37 кБк/м^2 . В наиболее пострадавших районах на территориях с плотностью загрязнения более 555 кБк/м^2 насчитывалось 640 населенных пунктов с населением около 230000 человек.

КРИТЕРИИ БЕЗОПАСНОСТИ НАСЕЛЕНИЯ И ДОПУСТИМЫЕ УРОВНИ СОДЕРЖАНИЯ РАДИОНУКЛИДОВ В СЕЛЬСКОХОЗЯЙСТВЕННОЙ ПРОДУКЦИИ

В соответствии с Нормами радиационной безопасности [18], вступившими в силу в 1986 г., Минздрав СССР ввел временный предел средней эквивалентной дозы на все тело жителя населенного пункта в 100 мЗв в течение первого года после чернобыльского выброса (с 26 апреля 1986 г. по 26 апреля 1987 г.), затем 30 мЗв в течение второго года и по 25 мЗв в 1988 и 1989 г. [18]. В целом до 1 января 1990 г. доза для населения не должна была превышать 173 мЗв .

Для ограничения внутреннего облучения населения в СССР, и впоследствии Беларуси, России и Украине, были разработаны временные допустимые уровни ВДУ содержания радионуклидов в пищевых продуктах (табл. 1).

Первые ВДУ, утвержденные Минздравом СССР 6 мая 1986 г., касались ограничения содержания в продукции ^{131}I как доминирующего фактора внутреннего облучения человека в ранний период аварии и были направлены на ограничение облучения щитовидной железы детей. ВДУ, принятые 30 мая 1986 г., ограничивали содержания всех β -излучателей в пищевых продуктах, вызванных поверхностным загрязнением. Более поздние ВДУ, введенные в действие в 1988 г. (ВДУ-88) и 1991 г. (ВДУ-91), касались суммы активности ^{134}Cs и ^{137}Cs . ВДУ-91 были дополнены ограничениями по содержанию ^{90}Sr . Впоследствии были введены нормативы СанПиН, которые рассматривались как неаварийные нормативы [25, 26] и действовали на всей территории Российской Федерации.

Годовое потребление сельскими жителями обычного пищевого рациона, все компоненты которого содержат радионуклиды цезия на уров-

Таблица 1. Временные допустимые уровни (ВДУ, Бк/кг, Бк/л) содержания радионуклидов в основных пищевых продуктах и питьевой воде, установленные в СССР (1986–1991 гг.) и Российской Федерации после Чернобыльской аварии [18–26]

Table 1. Temporary Permissible Levels (TPL, Bq/kg, Bq/l) of Radionuclide Concentrations in Basic Food and Drinking Water Established in the USSR (1986–1991) and the Russian Federation after the Chernobyl Accident [18–26]

ВДУ/ДУ	4104–88	129–252	ВДУ-88	ВДУ-91		ДУ 2001	
Дата утверждения	6.05.1986	30.05.1986	15.12.1987	22.01.1991		14.11.2001	
Радионуклид	^{131}I	$\Sigma \beta$ -излучателей	$^{134+137}\text{Cs}$	$^{134+137}\text{Cs}$	^{90}Sr	^{137}Cs	^{90}Sr
Питьевая вода	3700	370	18.5	18.5	3.7	11	4.9
Молоко	370–3700	370–3700	370	370	37	100	25
Молочные продукты	18 500–74 000	3700–18 500	370–1850	370–1850	37–185	50–200	25–100
Детское питание	–	–	370	185	3.7	40	25
Мясо и мясные продукты	–	3700	1850–3000	740	–	200	–
Рыба	37000	3700	1850	740	–	130	100
Овощи, фрукты, карто- фель, корнеплоды	–	3700	740	600	37	80	40
Хлеб, мука, зерновые продукты	–	370	370	370	37	40–60	20–30

не ВДУ-86, привело бы к дозе внутреннего облучения менее 50 мЗв, ВДУ-88 – менее 8 мЗв, а ВДУ-91 – менее 5 мЗв.

Общая политика СССР, а затем и регулирующих органов СНГ, была направлена на снижение как радиологических критериев, так и ВДУ наряду с естественным улучшением радиологических условий в результате распада радионуклидов. Постепенное уменьшение ВДУ являлось фактором, оказывавшим влияние на производителей, которые должны были использовать технологии, обеспечивающие безопасное содержание радионуклидов в производимой продукции. Снижение ВДУ в первую очередь было направлено на уменьшение доз внутреннего облучения населения, однако учитывало и возможность ведения сельского и лесного хозяйства на загрязненных территориях. В ряде случаев ограничения привели к неоправданным потерям при производстве продуктов питания и повлияли на процесс экономического восстановления пострадавших районов.

После распада СССР в 1991 г. в Беларуси, России и Украине проводилась собственная политика радиационной защиты населения и применения защитных мероприятий в сельском хозяйстве. В то же время в связи с принятием МКРЗ в 1990 г. годового предела эффективной дозы облучения населения на практике, равного 1 мЗв [27], этот уровень был признан безопасным и в послеаварийных условиях [18]. Поэтому он по-прежнему используется в законодательстве Российской Федерации в качестве критерия для обоснования системы долгосрочных реабилитационных мероприятий.

ЗАЩИТНЫЕ МЕРОПРИЯТИЯ В ПЕРВЫЙ ПЕРИОД ПОСЛЕ АВАРИИ

Систему ведения производства сельскохозяйственной продукции на момент аварии можно разделить на две группы: крупные коллективные хозяйства (колхозы, совхозы) и частный сектор. Коллективные хозяйства в земледелии использовали севообороты, применяли научно обоснованные системы обработки почв и внесения агрохимикатов (минеральные и органические удобрения, известь, доломитовая мука и др.). Для кормления животных разрабатывались специальные рационы, а для заготовки кормов создавались улучшенные сенокосы и пастбища. В частном секторе применение минеральных удобрений не было систематическим, широко использовалось внесение органических удобрений (навоз). Выпас частного поголовья животных осуществлялся, как правило, на природных лугах, лесных опушках и т.п. Эти различия приводили к более высокому накоплению радионуклидов в продукции, производимой в личных подсобных хозяйствах по сравнению с крупными коллективными хозяйствами.

Авария произошла в самый уязвимый сезон с точки зрения ее воздействия на сельское хозяйство. Сельскохозяйственные животные уже находились на пастбищах, а возможности предотвратить или уменьшить загрязнение продуктов животноводства были весьма ограничены из-за нехватки незагрязненных кормов. В первые дни и недели после аварии концентрации радиологически значимых радионуклидов значительно превышали национальные и международные норма-

тивы, ограничивающие содержание радионуклидов в продуктах питания [4, 7, 28].

В течение первых недель после аварии ^{131}I был основным радионуклидом, определявшим дозы внутреннего облучения. Другие радионуклиды (^{95}Zr , ^{95}Nb , $^{103/106}\text{Ru}$, ^{140}Ba и ^{140}La , $^{141/144}\text{Ce}$) оказывали незначительное влияние из-за коротких периодов полураспада. С июня 1986 г. в большинстве проб окружающей среды (за исключением 30-километровой зоны ЧАЭС) и пищевых продуктов преобладал радиоактивный цезий [7].

Основной целью контрмер в первый период являлись ограничение (или запрет) потребления населением загрязненного молока и уменьшение концентраций ^{131}I в молоке [10]. В наиболее загрязненных районах одной из первоочередных мер являлось обеспечение населения (в первую очередь детей) привозным молоком из “чистых” регионов. Применение защитных мероприятий было в основном направлено на снижение уровней загрязнения молока, производимого в общественном секторе. Рекомендации включали следующие мероприятия [28, 29]:

- исключение из рациона животных загрязненного пастбищного травостоя путем перевода с пастбищного на стойловое содержание;
- радиационный контроль и бракераж молока с превышением допустимых уровней содержания ^{131}I (3700 Бк/л);
- переработка молока и производство продуктов, соответствующих ВДУ (сухое и сгущенное молоко, масло, сыры и др.).

В ряде районов из-за несвоевременного применения ограничительных и защитных мер поступление йода с молоком привело к формированию высоких доз облучения и стало одной из причин рака щитовидной железы [7, 11, 12].

В соответствии с решением Правительства СССР об эвакуации населения из 30-километровой зоны вокруг Чернобыльской АЭС (начиная со 2 мая 1986 г.), вместе с населением было эвакуировано около 50000 голов крупного рогатого скота, 13000 свиней, 3300 овец и 700 лошадей [7]. Из-за недостатка фуража для эвакуированных животных и трудностей в управлении на территориях, куда они были перевезены, часть из них впоследствии были забиты [7, 12, 30]. Трупы животных были захоронены, однако некоторые из них хранились в холодильниках, что привело к необходимости решать санитарно-гигиенические вопросы и обусловило экономические потери [7]. Всего за период с мая по июль 1986 г. общее количество забитых животных достигло 95500 голов крупного рогатого скота и 23000 свиней.

Кормление животных “чистыми” кормами было бы весьма эффективным для снижения содержания ^{137}Cs в продукции до приемлемого

уровня в течение 1–2 мес. Однако эта контрмера в первый период не получила широкого распространения, главным образом из-за нехватки незагрязненных кормов в конце периода стойлового содержания животных [12].

В начале июня 1986 г. были составлены первые карты плотности радиоактивных выпадений в загрязненных районах. Это позволило оценить уровни загрязнения пастбищ и определить уголья, где невозможно получение молока, соответствующего ВДУ [11]. Эти данные послужили основанием для принятия решений о введении запрета на содержание молочного скота. Радиационный контроль был введен на всех стадиях производства, хранения и переработки сельскохозяйственной и пищевой продукции [4].

На основе радиологического обследования около 130.0, 17.3 и 57.0 тыс. га сельскохозяйственных угодий были исключены из хозяйственного использования в Беларуси, России и Украине соответственно [7]. Критерием невозможности хозяйственного использования земель было превышение уровня плотности выпадений ^{137}Cs (1480 кБк/м²). Для территорий с плотностью загрязнения выше 185 и 555 кБк/м² были разработаны рекомендации и предложены контрмеры, направленные на уменьшение поступления ^{137}Cs в сельскохозяйственную продукцию [4]:

- исключение некоторых технологических операций при обработке почв и уборке урожая для снижения пылеобразования;
- увеличенные дозы применения калийно-фосфорных удобрений;
- коренное улучшение сенокосов и пастбищ;
- ограничение использования органических удобрений, в частности, загрязненного навоза;
- содержание животных на чистых кормах в течение 1.5 мес. до убоя;
- ограничение потребления молока, производимого в частном секторе;
- обязательный радиационный контроль сельскохозяйственной продукции.

Дезактивация, включающая удаление верхнего загрязненного слоя, не была отнесена к мероприятиям, подходящих для сельского хозяйства, из-за высокой стоимости, нарушения плодородия почвы и проблем, связанных с захоронением загрязненной почвы [4, 7].

ЗАЩИТНЫЕ МЕРОПРИЯТИЯ НА ПРОМЕЖУТОЧНОЙ И ВОССТАНОВИТЕЛЬНОЙ СТАДИЯХ ПОСЛЕ АВАРИИ

Рекомендации по применению защитных мероприятий неоднократно пересматривались и обновлялись [32–36] в зависимости от изменений

радиационной обстановки, ужесточения нормативов по содержанию радионуклидов в продукции и экономической ситуации.

Агрохимические и агротехнические мероприятия

На пахотных угодьях применялся комплекс агрохимических и агротехнических мероприятий, которые включали: вспашку (стандартная или с оборотом пласта), известкование (с внесением повышенных доз извести с учетом уровней загрязнения почв), внесение минеральных удобрений (с увеличением доз внесения фосфора и калия) [4, 10]. Объемы проведения агрохимических и агротехнических мероприятий после аварии на ЧАЭС приведены на рис. 1.

Первоочередное внимание при реабилитации загрязненных территорий уделялось применению агротехнических технологий коренного и поверхностного улучшения сенокосов и пастбищ для получения кормов, соответствующих ветеринарным радиологическим требованиям [31].

Вспашка — технологический прием, который широко использовался на загрязненных территориях. Вспашка приводит к перераспределению радионуклидов в пахотном слое почв и уменьшению концентрации радионуклидов в слое почвы, где осуществляется минеральное питание растений. Вспашка с оборотом пласта и глубокая вспашка (глубже обычного пахотного слоя) были возможны только на участках с плодородными почвами с глубоким гумусовым горизонтом. Кратность снижения коэффициентов перехода радионуклидов в растения варьировала от 2 при обычной вспашке до 15–20 раз при вспашке с оборотом пласта, и этот эффект сохраняется в течение многих лет [4, 5, 10–14, 17].

Известкование применялось на почвах с низкой кислотностью почв, которые широко распространены в наиболее загрязненных регионах. Поскольку переход радионуклидов в растения зависит от кислотности почв, известкование поддерживает реакцию почвенного раствора вблизи нейтральной, позволяя достичь минимальных значений коэффициента перехода ^{137}Cs в растения. На основании исследований, выполненных во ВНИИРАЭ [31, 32], дозы внесения мелиорантов были увеличены в среднем в 1.5 раза в зависимости от свойств почвы и вида культуры, обеспечивая снижение поступления радионуклидов в растения в 1.5–4.0 раза.

Минеральные удобрения широко использовались для снижения накопления ^{137}Cs сельскохозяйственными культурами, в первую очередь калийные, так как снижение перехода радионуклида основано на уменьшении соотношения Cs : K в почвенном растворе [7]. Оптимальное соотношение, определенное в результате проведенных на-

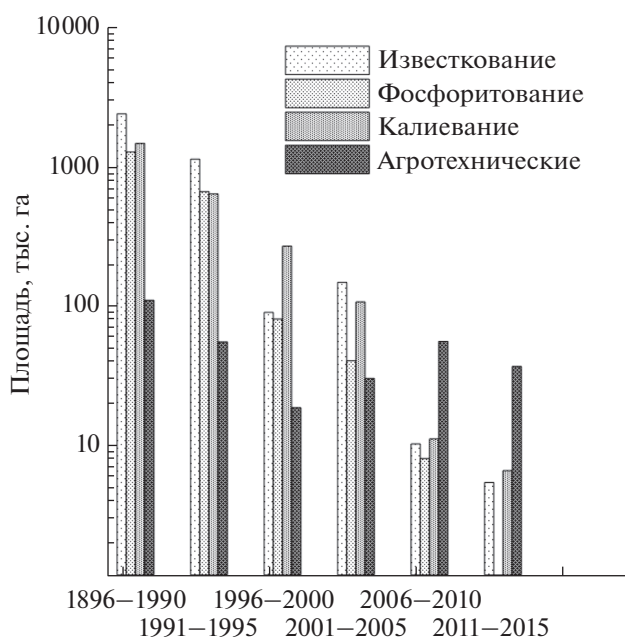


Рис. 1. Объемы применения агрохимических и агротехнических мероприятий в районах Российской Федерации, подвергшихся загрязнению после аварии на ЧАЭС.

Fig. 1. Changes with time in the extent of agricultural areas treated with of agrochemical and agrotechnical measures in the area of the Russian Federation contaminated by the Chernobyl accident.

учных исследований и производственных испытаний, составило N : P : K как 1 : 1.5 : 2 [23].

Коренное улучшение кормовых угодий, которое включало дискование дернины, вспашку, известкование, внесение удобрений и посев травосмесей, оказалось очень эффективным мероприятием, обеспечивая снижение поступления в травостой радиоцезия на минеральных почвах до 2–3 раз, а на органических — до 3–5 раз. Эффективность технологии зависит от типа луга и свойств почвы [37, 38]. Одно из ограничений заключается в том, что коренное улучшение не может быть использовано на крутых склонах и в поймах рек. В этих случаях применяется поверхностное улучшение, которое включает дискование, внесение удобрений (в соотношении N : P : K 1 : 1,5 : 2), известкование и подсев трав.

Изменение структуры землепользования

Организация земледелия на загрязненных территориях осуществляется на основании научно обоснованной структуры землепользования, которая определяет размещение и соотношение различных земельных угодий (естественные и культурные пастбища и сенокосы, пахотные земли, залежи, сады и др.). Для различных видов возделываемых культур коэффициенты перехода ра-

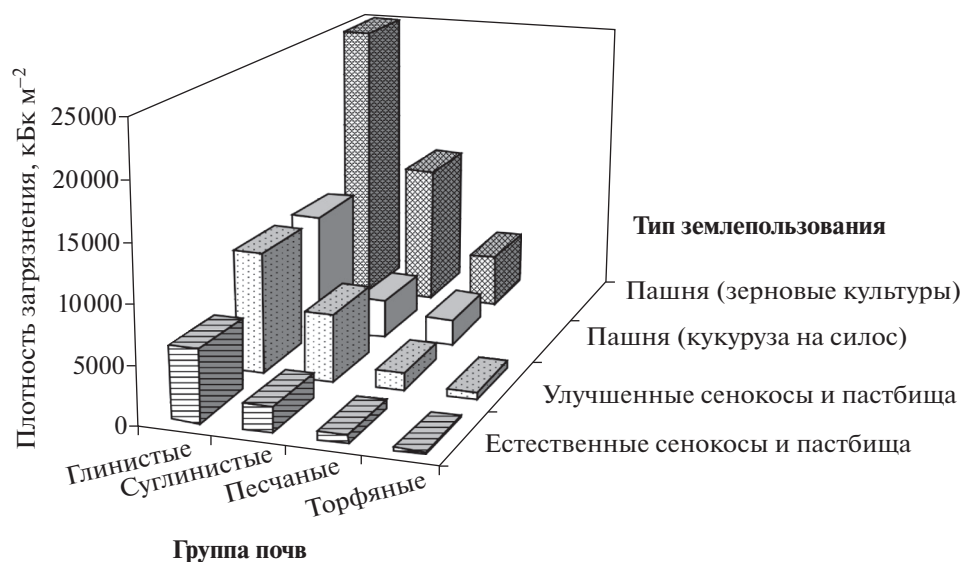


Рис. 2. Плотности выпадений, при которых возможно получение продукции, соответствующей ВДУ-93.
Fig. 2. Deposition densities at which it is possible to obtain products corresponding to the TPL 93.

дионуклидов могут отличаться до 100 раз и более [7, 10, 39]. Таким образом, загрязнение сельскохозяйственной продукции зависит как от типа почвы, так и от вида землепользования. В качестве примера можно привести оценку плотности выпадений ¹³⁷Cs, при которой содержание радионуклида в сельскохозяйственной продукции, производимой на различных видах угодий в 1994 г., не превысило бы ВДУ-93 (рис. 2).

Существенные различия в возможности получения продукции, соответствующей ВДУ, на сельскохозяйственных угодьях различного типа открывают возможность для оптимизации структуры землепользования, размещая культуры с низким накоплением радионуклидов на территориях с более высокими уровнями загрязнения, а культуры с высоким накоплением ¹³⁷Cs на участках с более низкой плотностью выпадений.

Достаточно перспективным вариантом является использование загрязненных земель для выращивания технических культур. Так, в Беларуси на наиболее загрязненных сельскохозяйственных угодьях были размещены посевы рапса, семена которого были переработаны на пищевое масло, топливо и белковый жмых в качестве корма для животных [40]. Производство рапсового масла оказалось эффективным, экономически оправданным способом использования загрязненных земель.

Содержание животных на “чистых” кормах

Целью содержания животных на “чистых” кормах, т.е. кормах, не загрязненных радионуклидами (либо с низким уровнем их содержания), яв-

ляется предотвращение поступления радионуклидов в организм сельскохозяйственных животных и, как следствие, в производимую продукцию (молоко, мясо). Особенно эффективно это мероприятие при откорме мясного скота перед забоем. На территориях, подвергшихся загрязнению после аварии на ЧАЭС, эффективность этой технологии и продолжительность ее применения контролировались с помощью прижизненного измерения содержания ¹³⁷Cs в организме сельскохозяйственных животных. Для обоснования содержания животных на “чистых” кормах и предотвращения забоя скота с содержанием ¹³⁷Cs в мышцах выше ВДУ, за период с 1986 по 2000 г. было проведено более 447 тыс. прижизненных измерений содержания ¹³⁷Cs, что позволило избежать существенных потерь при производстве мяса на загрязненных территориях (рис. 3).

Объемы применения технологии откорма животных “чистыми” кормами постоянно увеличивались в 1986–1992 гг. и составили в Российской Федерации от 55 до 75 тыс. голов крупного рогатого скота. В 2000–2008 гг. количество головообработок снизилось и составило от 5 до 20 тыс. голов.

Использование сорбентов цезия

После 1994 г., когда была разработана технология применения цезийсвязывающих сорбентов в желудочно-кишечном тракте (ЖКТ) животных, этот вид защитных мер стал одним из наиболее распространенных приемов, позволяющим производить продукцию животноводства (молоко, мясо), соответствующую нормативам, на территориях с высокими уровнями загрязнения.

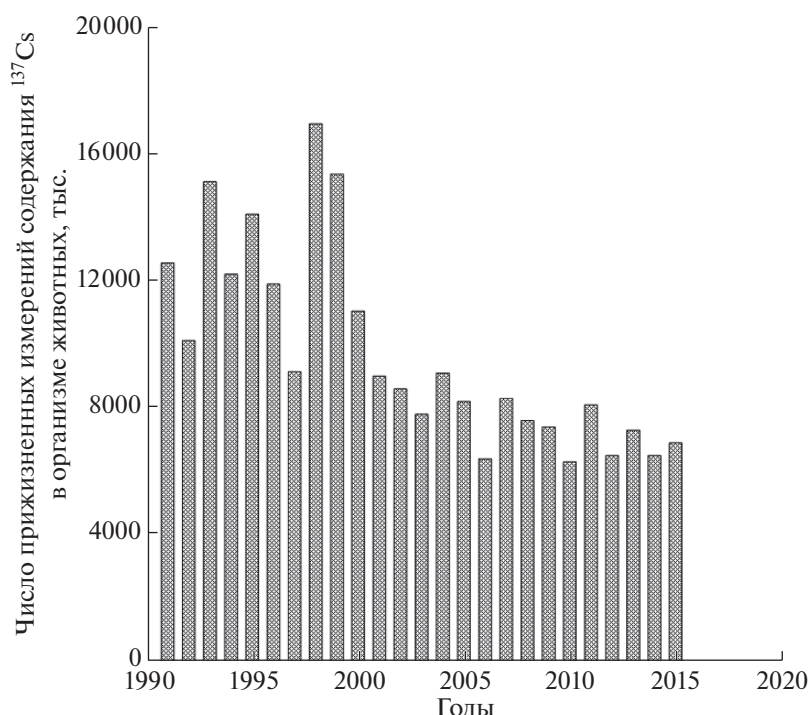


Рис. 3. Число прижизненных определений содержания ^{137}Cs в организме животных.

Fig. 3. Number of live monitoring measurements of animals after the ChNPP accident in Russia.

При разработке данной технологии была изучена эффективность использования различных сорбентов, которые применялись в виде химических соединений или глин, добавляемых в компоненты рациона, либо вводились в виде боллюсов, обеспечивающих медленное высвобождение сорбента в ЖКТ. Исследования показали высокую эффективность соединений ферроцина (гексаферрата) для связующих радиоактивного цезия [7, 41, 42]. Применение ферроцина обеспечивало снижение содержания ^{137}Cs в продуктах животноводства до 3–5 раз и более [42]. Все формы соединений гексаферроцианидов обладают низкой токсичностью и поэтому были безопасны для животных. Количество головообработок крупного рогатого скота, ежегодно обрабатываемого ферроцином в различной форме, показано на рис. 4.

Применение ферроцина было особенно эффективным в населенных пунктах, где не было возможности обеспечения частного поголовья животных улучшенными пастбищами. Ферроцин широко использовался в России и Беларуси и в очень ограниченных масштабах в Украине, поскольку стоимость закупки препаратов в Западной Европе была слишком высокой. Вместо этого в небольших масштабах использовали доступные на местах глинистые минералы, которые менее эффективны, чем ферроцин, но дешевле при использовании [7].

Переработка сельскохозяйственной продукции

После аварии на Чернобыльской АЭС были разработаны и успешно внедрены в пищевой промышленности технологии переработки сель-

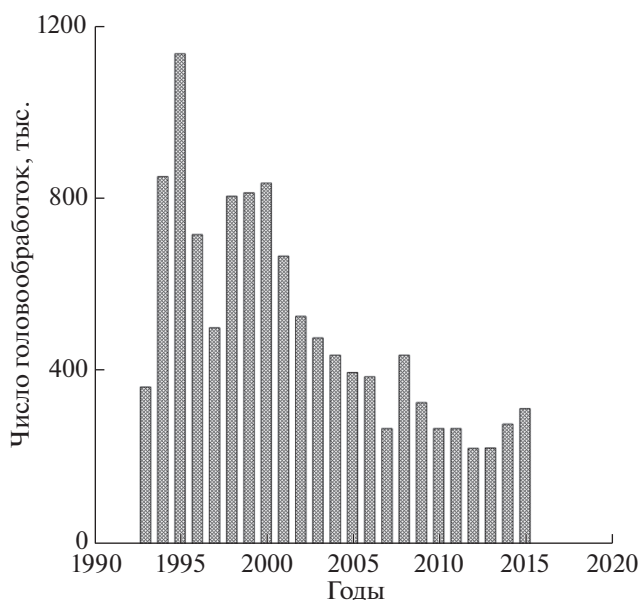


Рис. 4. Число головообработок КРС сорбентами, связывающими ^{137}Cs в организме животных.

Fig. 4. Number of cattle treatments with ^{137}Cs binding sorbents.

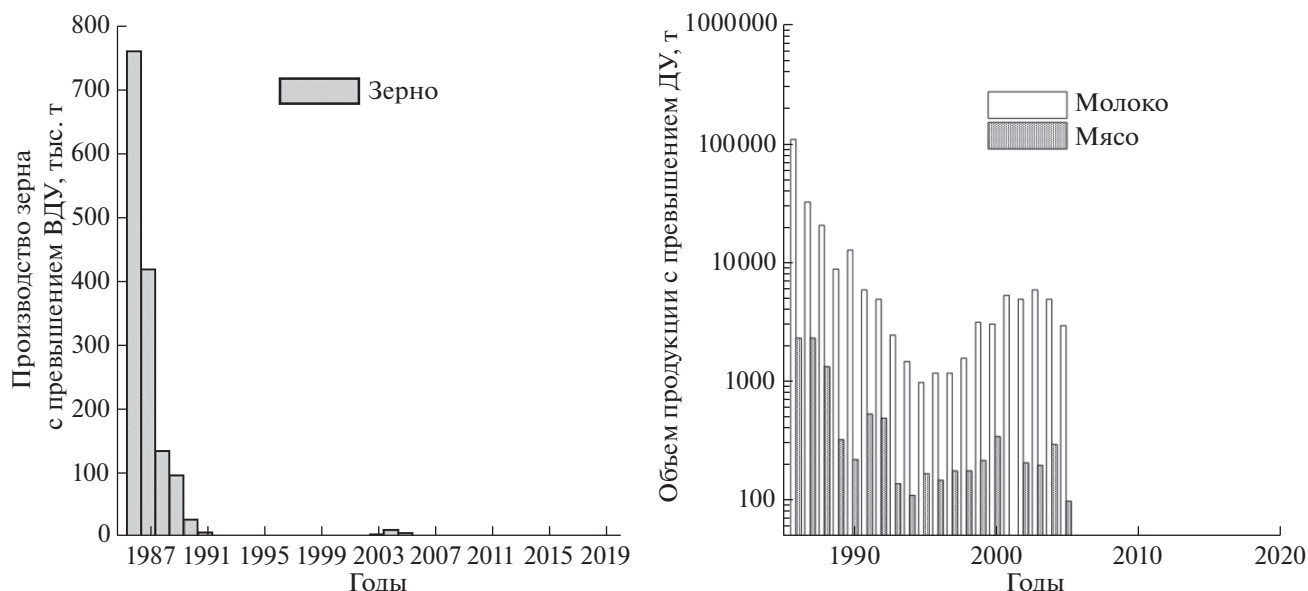


Рис. 5. Объемы производства зерна, молока и мяса с содержанием радиоцезия, превышающим ВДУ.
Fig. 5. Production of grain, milk and meat production with radiocaesium concentrations exceeding the TPL.

скохозыятственной продукции, обеспечивающие снижение содержания радионуклидов в конечном продукте. Комплекс методов переработки молока обеспечивал снижение содержания ^{90}Sr и ^{137}Cs в молочной продукции (масло, сыры, сухое и сгущенное молоко) до 7–10 раз по сравнению с исходным.

Было показано, что использование стандартных методов переработки продукции, используемых в пищевой промышленности, позволяет производить ряд пищевых продуктов (крахмал, растительное масло, спирт и др.), соответствующих санитарно-гигиеническим требованиям. Следует особо подчеркнуть высокую эффективность переработки сельскохозяйственной продукции в острой фазе после аварии.

ЭФФЕКТИВНОСТЬ ЗАЩИТНЫХ И РЕАБИЛИТАЦИОННЫХ МЕРОПРИЯТИЙ В СЕЛЬСКОМ ХОЗЯЙСТВЕ

Применение защитных и реабилитационных мер в сельском хозяйстве преследовало три основные цели: 1) гарантировать производство пищевых продуктов, соответствующих ВДУ, 2) обеспечить скорейшее снижение доз облучения населения ниже 1 мЗв и 3) свести к минимуму коллективные дозы для населения на основе принципа АЛАРА.

Снижение загрязнения сельскохозяйственной продукции

Данные радиационного мониторинга показали, что начиная с мая 1986 г. в четырех областях

России (Брянская, Тульская, Калужская, Орловская) были выявлены большие объемы продукции, с содержанием радионуклидов, превышающим ВДУ для ^{137}Cs . В наиболее загрязненных районах Брянской области доля зерна, молока и мяса с содержанием радиоцезия, превышающая ВДУ, в течение первого года после аварии достигала 80% и выше (рис. 5) [38, 41].

С 1987 г. высокие концентрации радиоактивного цезия в сельскохозяйственной продукции, главным образом в продукции животноводства, и применение контрмер, направленных на снижение концентраций ^{137}Cs в молоке и мясе, были ключевыми направлениями стратегии реабилитации в сельском хозяйстве. Широкомасштабное применение ряда контрмер позволило добиться резкого сокращения количества продуктов животного происхождения с концентрациями радиоактивного цезия выше ВДУ. Концентрации радиоцезия в зерне, картофеле и корнеплодах были достаточно низкими в большинстве загрязненных районов. К 1991 г. доля зерна с содержанием ^{137}Cs выше 370 Бк/кг составляла менее 0.1% (рис. 5).

После 2001 г. из-за ужесточения ВДУ по содержанию ^{137}Cs в зерне до 160 Бк/кг, а также снижения объемов проведения реабилитационных мероприятий доля зерна с превышающим ВДУ содержанием ^{137}Cs увеличилась и составила в наиболее загрязненных районах около 20%.

Максимальный эффект от применения защитных мероприятий в сельском хозяйстве был достигнут в 1986–1992 гг. В результате применения контрмер в пострадавших районах (главным образом, коренного улучшения и перевода живот-

Таблица 2. Вклад факторов, определяющих снижение содержания ^{137}Cs в сельскохозяйственной продукции в районах России, подвергшихся загрязнению после аварии на ЧАЭС [41]**Table 2.** Contribution of factors determining the reduction of ^{137}Cs concentration in agricultural products in the regions of the Russian Federation contaminated after the Chernobyl accident [41]

Факторы	Районы с интенсивным применением контрмер (Брянская область)		Районы с ограниченным применением контрмер (Калужская область)	
	молоко, мясо	картофель, зерно	молоко, мясо	картофель, зерно
Природные биогеохимические процессы	0.33	0.36	0.60	0.73
Контрмеры	0.61	0.57	0.28	0.12
Радиоактивный распад	0.06	0.07	0.12	0.15

ных на “чистые” корма) уровни загрязнения продукции животноводства постоянно снижались. С 1991 г. доля продукции с концентрациями цезия, превышающими ВДУ, составляла <10% от валового объема продукции, полученной на загрязненных территориях.

Из-за экономических трудностей в середине 1990-х годов применение защитных мероприятий в растениеводстве (минеральные удобрения, известкование, агротехнические мероприятия) было сокращено. В то же время путем оптимизации имеющихся ресурсов эффективность контрмер в отношении ^{137}Cs осталась на уровне, достаточном для поддержания приемлемого содержания ^{137}Cs в большинстве продуктов животноводства (рис. 5).

Оценка эффективности реабилитационных мероприятий в послеварийный период должна учитывать не только снижение загрязнения продукции в результате проведения мероприятий, но и в результате физического распада, а также постепенной фиксации радионуклидов в почве, т.е. снижением их биологической доступности для включения в пищевые цепочки. Темпы снижения содержания ^{137}Cs в пищевых продуктах, особенно в молоке, существенно различались в пострадавших районах и в течение времени после аварии. Это было связано в значительной степени с допустимыми объемами проведения коренного улучшения сенокосов и пастбищ, которое проводилось поэтапно с учетом поголовья животных и необходимой для их содержания площадью кормовых угодий. Эффективность сельскохозяйственных контрмер по критерию снижения содержания ^{137}Cs в основных пищевых продуктах возрастала в период с 1987 по 1992 г., когда мероприятия применялись в пострадавших районах в необходимых объемах. В Брянской области, где контрмеры были начаты раньше и в больших масштабах, экологический период снижения концентраций ^{137}Cs в молоке (T_{ec}), рассчитанный за 1987–1992 гг., был значительно короче (1.0–2.8 года), чем в Калужской области (2.3–4.8 года), где основной вклад в снижение содержания ^{137}Cs в про-

дукции вносили естественные биогеохимические процессы, определяющие связывание радионуклидов в почвах и снижение их подвижности [41].

Предполагая, что снижение содержания ^{137}Cs в пищевых продуктах было вызвано влиянием трех групп факторов – естественных биогеохимических процессов, контрмер и радиоактивного распада, был оценен вклад каждого из этих факторов для районов с различной интенсивностью применения защитных мероприятий (табл. 2).

С 1987 по 1994 г. вклад контрмер в снижение загрязнения сельскохозяйственной продукции в регионе с интенсивным применением защитных мер составил 60%. В регионах с ограниченным применением контрмер преобладающий вклад в уменьшение загрязнения продукции ^{137}Cs (до 70%) вносили естественные биогеохимические процессы.

Эффективность реабилитационных мероприятий по критерию снижения доз облучения населения

Применение защитных и реабилитационных мероприятий в сельском хозяйстве после аварии на ЧАЭС привело к значительному снижению как индивидуальных, так и коллективных доз облучения местного населения. В 1991–1999 гг. применение контрмер позволило снизить годовые эффективные дозы сельского населения, проживающего в зоне с плотностью радиоактивного загрязнения 185–370 кБк/м² в среднем на 22%, в зоне 370–55 кБк/м² – на 32%, а в населенных пунктах с загрязнением выше 555 кБк/м² снижение годовых доз облучения населения составило более 40% [43].

Оценка предотвращенной коллективной дозы после применения контрмер в сельском хозяйстве является достаточно сложной задачей и требует как о применении контрмер, так и об использовании пищевых продуктов/кормов, произведенных на загрязненных территориях. Кроме того, контрмеры проводились как в частном, так и общественном секторах, что влияло на

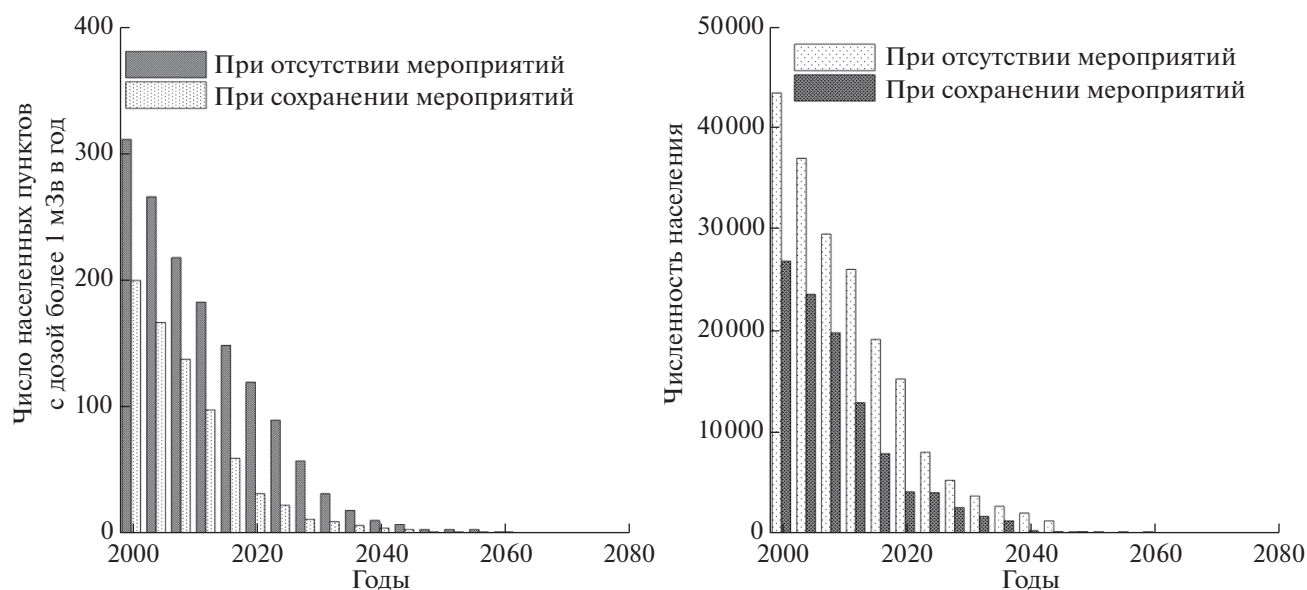


Рис. 6. Изменение числа населенных пунктов Российской Федерации и проживающего в них населения с дозой облучения более 1 мЗв в год. Оценки сделаны на основе данных работы [43] для ситуации отсутствия защитных и реабилитационных мероприятий и проведения мероприятий в существующих объемах.

Fig. 6. Changes with time in the number of rural settlements with annual dose exceeding 1 mSv/y. The estimates are based on the data of [43].

снижение доз облучения как сельского, так и городского населения. Оценки предотвращенной дозы, основанные на подходе, предложенном в работе [43], показали, что за 20 лет после аварии предотвращенная доза после применения контрмер в частном секторе сельских населенных пунктов Беларуси и России составила 7300 чел.-Зв. Основной вклад в предотвращенную коллективную дозу (5500 чел.-Зв) среди сельского населения вносят наиболее загрязненные Гомельская и Брянская области.

Продукты питания, производимые в коллективном секторе, потребляются, в основном, городским населением, проживающим как на загрязненных территориях, так и в незагрязненных районах. Принимая во внимание экспорт продукции из загрязненных регионов, показано, что около половины предотвращенной внутренней коллективной дозы (7.5 тыс. чел.-Зв в Российской Федерации) было обусловлено применением защитных мероприятий в коллективных хозяйствах. Эти результаты согласуются с выводами Чернобыльского форума МАГАТЭ [7], где дозы внутреннего облучения населения на загрязненных территориях (учитывающие эффект защитных мероприятий) за тот же период времени были оценены в 6.0 тыс. чел.-Зв для Российской Федерации. Таким образом, предотвращенная доза за счет применения сельскохозяйственных защитных мероприятий составила примерно 55% от дозы внутреннего облучения, полученной при усло-

вии, если бы защитные и реабилитационные мероприятия в сельском хозяйстве не применялись.

Основными факторами, способствовавшими снижению коллективной дозы, были контрмеры в животноводстве, поскольку молоко вносило наибольший вклад во внутреннее облучение населения после чернобыльской аварии. В Брянской области такие контрмеры внесли 65–75% от общей предотвращенной дозы [8, 44].

Несмотря на значительное улучшение радиационной обстановки на загрязненных территориях через 35 лет после аварии, сохраняются достаточно большие площади сельскохозяйственных земель, на которых производится сельскохозяйственная продукция с превышением санитарно-гигиенических и ветеринарных требований. Доля такой продукции не превышает 10% и регистрируется в наиболее загрязненных районах Брянской области. Однако такие районы не могут считаться полностью реабилитированными, и требуется обоснование долгосрочной стратегии проведения необходимых сельскохозяйственных мероприятий.

Кроме того, несколько десятков тысяч человек все еще проживают в населенных пунктах с годовой эффективной дозой выше 1 мЗв, где должны быть приняты меры по защите населения. Изменение со временем числа населенных пунктов и жителей загрязненных территорий, которые потенциально могут получать годовые эффективные дозы выше 1 мЗв, показаны на рис. 6.

Очевидно, что применение реабилитационных мер в ограниченных масштабах будет оставаться необходимым, по крайней мере, в течение нескольких десятилетий (до 2045–2050 гг.), и для оптимизации их использования в долгосрочной перспективе после аварии необходимо продолжение применения мер по реабилитации загрязненных территорий. После 2050 г. дозы излучения, превышающие 1 мЗв, могут иметь место только на территориях, выведенных из землепользования.

ПЛАНИРОВАНИЕ РЕАБИЛИТАЦИОННЫХ МЕРОПРИЯТИЙ В ОТДАЛЕННЫЙ ПЕРИОД ПОСЛЕ АВАРИИ

При планировании реабилитационных мероприятий в долгосрочной перспективе после Чернобыльской аварии важно учитывать факторы, специфические для отдельных населенных пунктов, регионов и стран. К ним можно отнести: параметры перехода ^{137}Cs в сельскохозяйственную продукцию, особенности почвенного покрова и технологий ведения сельскохозяйственного производства, эффективность реабилитационных мероприятий и предпочтения при их выборе. Обоснование реабилитационных мероприятий на уровне отдельных населенных пунктов связано с оптимизацией мероприятий, направленных на снижение дозы облучения населения менее 1 мЗв в год. На региональном уровне внимание в основном сосредоточено на обосновании затрат на реабилитацию и оценке их эффективности с точки зрения смягчения последствий для здоровья населения, улучшения экономической ситуации в пострадавших регионах и возвращения их к условиям нормальной жизнедеятельности.

Для решения этих проблем при поддержке МАГАТЭ была создана система поддержки принятия решений ReSCA [45, 46]. Особенностью этой системы является использование критериев регулирования в области радиационной безопасности, предложенных в публикации МКРЗ 103 и рекомендуемых новым стандартом безопасности МАГАТЭ [47]. То есть в рамках системы рассматривается ситуация существующего облучения, а оптимизация осуществляется для “референтного человека”. Система была адаптирована для условий и радиологических параметров Белоруссии, России и Украины [48].

Стратегия реабилитации строится как последовательность мероприятий, проводимых в населенном пункте, регионе или в стране. Оптимизация достигается путем организации всех возможных мероприятий по определенному критерию оптимизации и реализации мероприятий с наибольшим значением критерия оптимизации. В системе ReSCA процесс оптимизации регулируется двумя критериями. Первый критерий —

это экономико-радиологическая эффективность мероприятия действия, второй — предпочтение лиц, отвечающих за реабилитацию загрязненных территорий к выбору этих мероприятий. Пользователь может изменить баланс между этими критериями, тем самым отдавая большее предпочтение либо экономической эффективности, либо предпочтениям к выбору реабилитационных мероприятий. Таким образом, в рамках системы рассматриваются различные стратегии проведения реабилитации загрязненных пунктов, от оценок, основанных на радиологических и экономико-радиологических показателях до оценок, в которых выбор мероприятий осуществляется полностью на экспертных предпочтениях населения или руководителей, отвечающих за результаты реабилитации загрязненных территорий.

Для иллюстрации основных особенностей выбора стратегий реабилитации были взяты данные по 290 населенным пунктам Беларуси, России и Украины, где годовые эффективные дозы в 2004 г. превышали 1 мЗв (рис. 6). В этих населенных пунктах проживали 78172 человека, в том числе 57960 человек на территории Российской Федерации [48]. Коллективная доза, оцененная за 2004 г., составляла около 65 чел.-Зв, причем три четверти этой дозы приходится на население в пострадавших российских регионах [47]. Распределение доз внешнего и внутреннего облучения в населенных пунктах различается в трех странах: в Беларуси доминирует внешнее облучение; в России оба пути одинаково важны; в Украине доза в основном обусловлена внутренним облучением. Примерно в половине населенных пунктов Беларуси и России годовая доза от потребления грибов и лесных продуктов сопоставима с годовой дозой от молока. В Украине молоко было основным источником внутреннего облучения в большинстве пострадавших населенных пунктов.

В настоящее время предотвращенная доза не подпадает под критерии ограничения и используется главным образом для целей оптимизации. В то же время этот критерий может использоваться для оценки медицинских последствий и позволяет оценивать инвестиции в реабилитацию по критерию уменьшения негативных эффектов для здоровья населения, подвергающегося радиационному воздействию.

Эффект реабилитации зависит как от специфических для данной местности факторов, которые непосредственно включены в анализ, так и от наличия средств для целей реабилитации. Таким образом, отношения, отражающие зависимость предотвращенных доз от затрат на реабилитацию, в пострадавших странах оказываются разными (рис. 6). В Беларуси тенденции, отражающие увеличение предотвращенной дозы за счет вложенных средств, становятся схожими для радиологи-

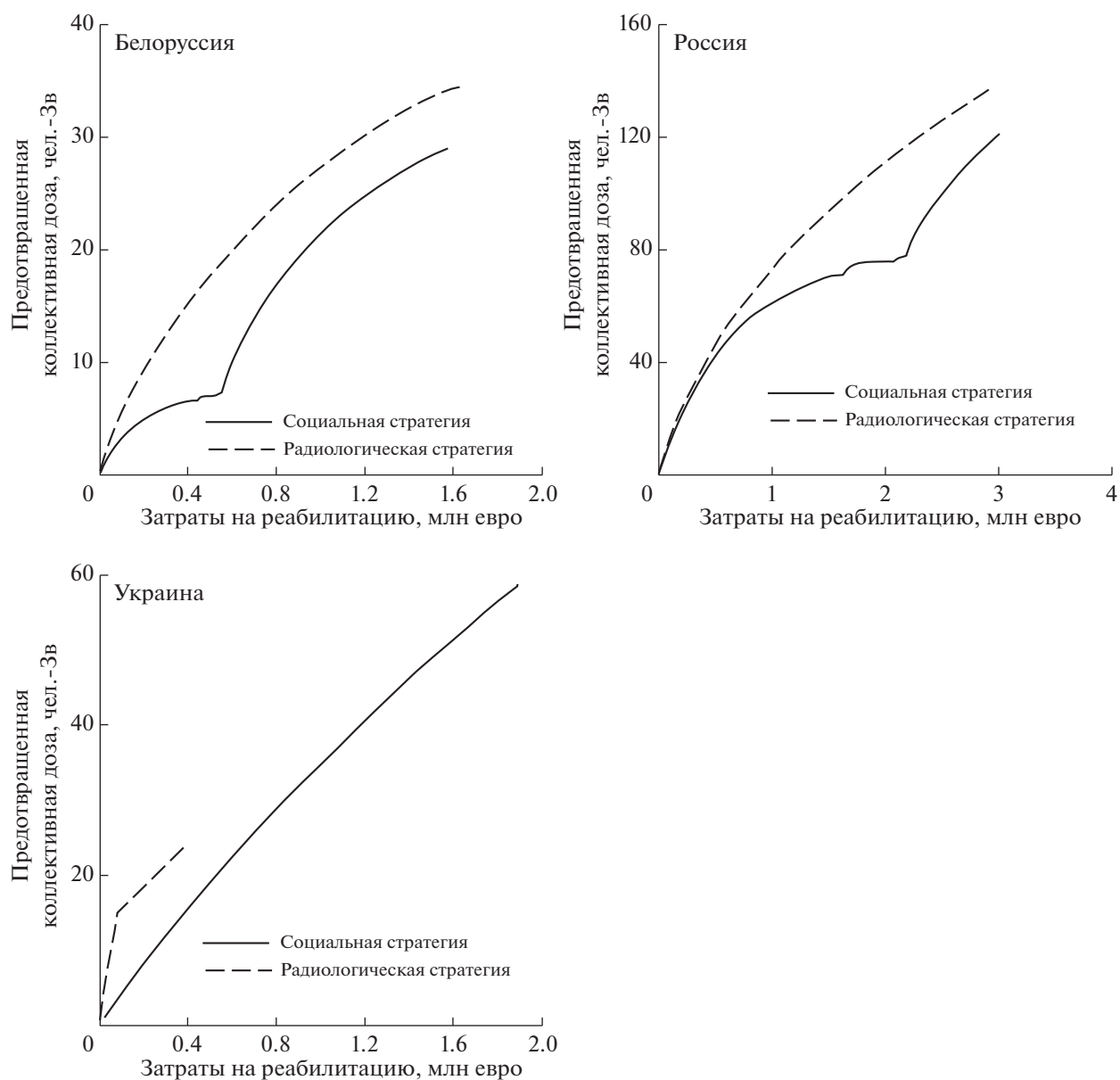


Рис. 7. Суммарная предотвращенная коллективная доза (чел.-Зв) в зависимости от средств, вложенных в реабилитацию (сплошная линия соответствует социальной стратегии, пунктирная линия – радиологической стратегии).

Fig. 7. Total averted collective dose (man-Sv) depending on the funds invested in rehabilitation (the solid line corresponds to the social strategy, the dotted line – to the radiological strategy).

ческой и социальной стратегий, если средства на реабилитацию превышают 1 млн евро, и в Украине, если они выше 0.1 млн евро (рис. 7).

В отличие от Беларуси и Украины экономическая эффективность радиологической и социальной стратегий близка в населенных пунктах России при использовании для реабилитации ресурсов на сумму менее 0.5 млн евро, в то время как социальная стратегия начинает быть менее эффективной по критерию предотвращенной дозы по сравнению с радиологической стратегией при более высоких затратах.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

За 35 лет, прошедшие после аварии на Чернобыльской АЭС, был разработан и применен широкий спектр эффективных защитных и реабилитационных мероприятий в сельском хозяйстве, обеспечивающих безопасное ведение производства на загрязненных территориях. Их масштабное применение на площади более 4.5 млн га позволило продолжить ведение сельскохозяйственного производства на загрязненных территориях и обеспечило существенное сокращение объемов продукции, не соответствующей санитарно-гиги-

еническим и ветеринарным требованиям по содержанию радионуклидов. Необходимо отметить, что эффективность применения защитных и реабилитационных мероприятий зависит от множества факторов, среди которых целесообразно выделить следующие: время после радиоактивных выпадений, природно-климатические условия, особенности ведения сельскохозяйственного производства, социально-экономические условия.

Эффективность защитных мероприятий зависела от времени и была наиболее высокой в первый (острый) период после выпадений. На этой стадии важным аспектом является своевременность информирования. Так, мероприятия в сельском хозяйстве были лишь частично эффективными в плане сокращения поступления радиоактивного йода в результате потребления молока из-за отсутствия своевременной информации и оперативной разработки необходимых контрмер.

Эффективность защитных мероприятий и объемы их применения зависят от доступных ресурсов. Например, коренное улучшение кормовых угодий не может быть одновременно применено на всей загрязненной территории, а проводится поэтапно с учетом поголовья животных в хозяйстве и необходимой для их содержания площадью кормовых угодий. Некоторые эффективные технологии были разработаны в период ликвидации аварии, так, применение ферроцина для животных начали применять только через 6 лет после аварийного выброса.

Эффективность мероприятий в частном секторе во многом зависела от отношения к этим мерам сельского населения. Повышение приемлемости принимаемых решений может быть достигнуто путем привлечения населения к рассмотрению данных вопросов и предоставления полноценной информации о последствиях аварии и эффективности рекомендуемых мероприятий.

Анализ опыта применения защитных и реабилитационных мероприятий в сельском хозяйстве убедительно показывает их возможность существенно повысить эффективность аварийного реагирования в случае других аварий, связанных с выбросом радионуклидов в окружающую среду.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Израэль Ю.А., Квасникова Е.В., Назаров И.М., и др. Глобальное и региональное загрязнение территории европейской части бывшего СССР ^{137}Cs // Метеорология и гидрология. 1994. № 5. С. 5–9. [Izrael' Yu.A., Kvasnikova E.V., Nazarov I.M., i dr. Global'noe i regional'noe zagryaznenie territorii evropeiskoi chasti byvshego SSSR ^{137}Cs // Meteorologia i gidrologia. 1994. V. 5. P. 5–9 (In Russian)]
2. Ильин Л.А., Павловский О.А. Радиологические последствия аварии на Чернобыльской АЭС и меры,

принимаемые для их смягчения // Атомная энергия. 1988. Т. 65. № 2. С. 119–128. [Il'in L.A., Pavlovskii O.A. Radiologicheskie posledstviya avarii na Chernobyl'skoi AES i mery, prinimaemye dlya ikh smyagcheniya // Atomnaya energiya. 1988. V. 65. № 2. P. 119–128. (In Russian)].

3. Справочник по радиационной обстановке и дозам облучения в 1991 г. населения Российской Федерации в районах, подвергшихся радиоактивному загрязнению вследствие аварии на Чернобыльской АЭС / Под ред. М.И. Балонова. СПб.: Ариадна-Аркадия, 1993. 147 с. [Spravochnik po radiatsionnoi obstanovke i dozam oblucheniya v 1991 g. naseleniya Rossiiskoi Federatsii v raionakh, podvergshikhся radioaktivnomu zagryazneniyu vsledstvie avarii na Chernobyl'skoi AES / Pod red. M.I. Balonova. SPb.: Ariadna-Arkadiya, 1993. 147 s. (In Russian)]
4. Alexakhin R.M., Fesenko S.V., Sanzharova N.I. Serious radiation accidents and the radiological impact on agriculture // Radiat. Prot. Dosim. 1996. V. 64. № 1/2. P. 37–42.
5. Prister B.S., Perepelyatnikov G.P., Perepelyatnikova L.V. Countermeasures used in the Ukraine to produce forage and animal food products with radionuclide levels below intervention limits after the Chernobyl accident // Sci. Total Environ. 1993. V. 137. P. 183–198.
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 // J. Environ. Radioact. 2001. V. 56. № 1–2. P. 77–98.
7. IAEA. International Atomic Energy Agency. Environmental Consequences of the Chernobyl Accident and Their Remediation: Twenty Years of Experience. Report of the UN Chernobyl Forum Expert Group "Environment" (EGE). Vienna: IAEA, 2006. 166 p.
8. Панов А.В., Фесенко С.В., Санжарова Н.И. и др. Влияние сельскохозяйственных контрмер на облучение населения территорий, пострадавших от аварии на Чернобыльской АЭС // Радиация и риск. 2006. Т. 46. № 2. С. 273–279 [Panov A.V., Fesenko S.V., Sanzharova N.I. i dr. Vliyanie sel'skokhozyaistvennykh kontrmer na obluchenie naseleniya territorii, postradavshikh ot avarii na Chernobyl'skoi AES // Radiatsiya i risk. 2006. V. 46. № 2. P. 273–279 (In Russian)]
9. Марей А.Н., Бархударов Р.М., Новикова Н.Я. Глобальные выпадения ^{137}Cs и человек. М.: Атомиздат, 1974. 168 с. [Marei A.N., Barkhudarov R.M., Novikova N.Ya. Global'noe vypadeniya ^{137}Cs i chelovek. M.: Atomizdat, 1974. 168 s. (In Russian)]
10. Сельскохозяйственная радиоэкология / Под ред. Р.М. Алексахина и Н.А. Корнеева. М.: Экология, 1992. 400 с. [Sel'skokhozyaistvennaya radioekologiya / Pod red. R.M. Aleksakhina i N.A. Korneeva. M.: Ekologiya, 1992. 400 s. (In Russian)]
11. Fesenko S., Alexakhin R., Balonov M. et al. Twenty years' application of agricultural countermeasures following the Chernobyl accident: lessons learned // J. Radiol. Prot. 2006. V. 26. P. 351–359.
12. Fesenko S., Alexakhin R., Balonov M. et al. An extended critical review of twenty years of countermeasures used

- in agriculture after the Chernobyl accident // *Sci. Total Environ.* 2007. V. 383. P. 1–24.
13. Крупные радиационные аварии: последствия и защитные меры / Под ред. акад. РАН Л.А. Ильина, В.А. Губанова. М.: ИздАТ, 2001. 752 с. [Kрупnye radiacionnye avarii: posledstviya i zashchitnye mery / Pod red. akad. RAN L.A. Il'ina, V.A. Gubanova. M.: IzdAT, 2001. 752 s. (In Russian)]
 14. Радиоэкологические последствия аварии на Чернобыльской АЭС: биологические эффекты, миграция, реабилитация загрязненных территорий: Монография / Под ред. чл.-корр. РАН Н.И. Санжаровой и проф. С.В. Фесенко. М.: РАН, 2018. 278 с. [Radioekologicheskie posledstviya avarii na Chernobyl'skoj AES: biologicheskie efekty, migraciya, reabilitaciya zagryaznennyh territorij: Monografiya / Pod red. chl.-korr. RAN N.I. Sanzharovoj i prof. S.V. Fesenko. M.: RAN, 2018. 278 s. (In Russian)]
 15. IAEA. International Atomic Energy Agency. Present and future environmental impact of the Chernobyl accident, TECDOC-1240. Vienna: IAEA, 2001. 128 p.
 16. Научные основы реабилитации сельскохозяйственных территорий, загрязненных радиоактивными веществами в результате крупных радиационных аварий: Руководство / Под ред. Н.И. Санжаровой. Обнинск: ГНУ ВНИИСКХРАЭ, 2009. 150 с. [Nauchnye osnovy reabilitacii sel'skohozyajstvennyh territorij, zagryaznyonnyh radioaktivnymi veshchestvami v rezul'tate kрупnyh radiacionnyh avarij: Rukovodstvo / Pod red. N.I. Sanzharovoj. Obninsk: GNU VNIISKHRAE; 2009. 150 s. (In Russian)]
 17. *Alexakhin R.M.* Countermeasures in agricultural production as an effective means of mitigating the radiological consequences of the Chernobyl accident // *Sci. Total Environ.* 1993. V. 137. P. 9–20.
 18. *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 // *J. Radiol. Prot.* 2018. V. 38. P. 854–867.
 19. Современное допустимое содержание радиоактивного йода (^{131}I) в питьевой воде и пищевых продуктах на период проведения аварийных очистных работ (ТПЛ-86- ^{131}I), 6 мая 1986. М.: Минздрав СССР, 1986 [Sovremennoe dopustimoe sodержanie radioaktivnogo joda (^{131}I) v pit'evoj vode i pishchevyh produktah na period provedeniya avarijnnyh ochistnyh rabot (TPL-86- ^{131}I), 6 maya 1986. M.: Minzdrav SSSR, 1986. (In Russian)]
 20. ВДУ-86. Временные допустимые уровни содержания радиоактивных веществ в продуктах питания, питьевой воде, лекарственных травах (суммарная бета-активность). № 129–252/ДСП от 30 мая 1986 г. М.: Минздрав СССР, 1986. 1 с. [VDU-86. Vremennye dopustimye urovni sodержaniya radioaktivnyh veshchestv v produktah pitaniya, pit'evoj vode, lekarstvennyh travah (summarnaya beta-aktivnost'). № 129–252/DSP ot 30 maya 1986 g. M.: Minzdrav SSSR, 1986. 1 s. (In Russian)]
 21. ВДУ-87. Временные допустимые уровни содержания радионуклидов цезия-137 и цезия-134 в пищевых продуктах и питьевой воде. 15.12.1987 г. М.: Минздрав СССР, 1987. 2 с. [VDU-87. Vremennye dopustimye urovni sodержaniya radionuklidov ceziya-137 i ceziya-134 v pishchevyh produktah i pit'evoj vode. 15.12.1987 g. M.: Minzdrav SSSR, 1987. 2 s. (In Russian)]
 22. ВДУ-88. Временные допустимые уровни содержания радионуклидов цезия в пищевых продуктах и питьевой воде. № 129–152-2 от 06.10.1988 г. М.: Минздрав СССР, 1988. 2 с. [VDU-88. Vremennye dopustimye urovni sodержaniya radionuklidov ceziya v pishchevyh produktah i pit'evoj vode. № 129-152-2 ot 06.10.1988 g. M.: Minzdrav SSSR, 1988. 2 s. (In Russian)]
 23. ВДУ-91. Временные допустимые уровни содержания радионуклидов цезия и стронция-90 в пищевых продуктах и питьевой воде, устанавливаемые в связи с аварией на Чернобыльской АЭС. 22.01.1991 г. М., 1991. 2 с. [VDU-91. Vremennye dopustimye urovni sodержaniya radionuklidov ceziya i stronciya-90 v pishchevyh produktah i pit'evoj vode, ustanavlivaemye v svyazi s avariej na Chernobyl'skoj AES. 22.01.1991 g. M., 1991. 2 s. (In Russian)]
 24. ВДУ-93. Временные допустимые уровни содержания радионуклидов цезия-134, -137 и стронция-90 в пищевых продуктах. ГН 2.6.005-93. Государственный комитет санитарно-эпидемиологического надзора РФ. Утверждено Постановлением Госсанэпиднадзора России от 21 июля 1993 г. № 7. М., 1993. 3 с. [VDU-93. Vremennye dopustimye urovni sodержaniya radionuklidov ceziya-134, -137 i stronciya-90 v pishchevyh produktah. GN 2.6.005-93. Gosudarstvennyj komitet sanitarno-epidemiologicheskogo nadzora RF. Utverzhdeno Postanovleniem Gossanepidnadzora Rossii ot 21 iyulya 1993 g. № 7. M., 1993. 3 s. (In Russian)]
 25. Санитарно-эпидемиологические правила и нормативы СанПиН 2.3.2.1078-01 “Гигиенические требования безопасности и пищевой ценности пищевых продуктов” (утв. Главным государственным санитарным врачом РФ Г.Г. Онищенко 06.11.2001 г.) (с изменениями от 31 мая 2002 г., 20 августа 2002 г., 15 апреля 2003 г.) [Sanitarno-epidemiologicheskie pravila i normativy SanPiN 2.3.2.1078–01 “Gigienicheskie trebovaniya bezopasnosti i pishchevoj cennosti pishchevyh produktov” (utv. Glavnym gosudarstvennym sanitarnym vrachom RF G.G. Onishchenko 06.11.2001 g.) (s izmeneniyami ot 31 maya 2002 g., 20 avgusta 2002 g., 15 aprelya 2003 g.) (In Russian)]
 26. Санитарно-эпидемиологические правила и нормативы СанПиН 2.3.2.2650-10 “Гигиенические требования безопасности и пищевой ценности пищевых продуктов” (Дополнения и изменения № 18 к СанПиН 2.3.2.1078-01) (утв. постановлением Главного государственного санитарного врача РФ от 28 июня 2010 г. № 71) [Sanitarno-epidemiologicheskie pravila i normativy SanPiN 2.3.2.2650-10 “Gigienicheskie trebovaniya bezopasnosti i pishchevoj cennosti pishchevyh produktov” (Dopolneniya i izmeneniya № 18 k SanPiN 2.3.2.1078-01) (utv. postanovleniem Glavnogo gosudarstvennogo sanitarnogo vracha RF ot 28 iyunya 2010 g. № 71) (In Russian)]
 27. ICRP, 1991. 1990 Recommendations of the International Commission on Radiological Protection. ICRP Publication 60 // *Ann. ICRP.* 1991. V. 21. № 1–3.

28. Памятка для работников сельского хозяйства и населения, проживающего на следе аварийного выброса Чернобыльской АЭС. М.: Государственный агропромышленный комитет СССР, 1986. 15 с. [Pamyatka dlya rabotnikov sel'skogo khozyaistva i naseleniya, prozhivayushchego na slede avariinogo vybrosa Chernobyl'skoi AES. M.: Gosudarstvennyi agropromyshlenniy komitet SSSR, 1986. 15 s. (In Russian)]
29. Памятка для руководителей и специалистов сельского хозяйства по организации работ "вахтовым способом" при уборке урожая в зоне радиоактивного загрязнения. Министерство здравоохранения СССР. М.: Государственный агропромышленный комитет СССР, 1986. [Pamyatka dlya rukovoditelei i spetsialistov sel'skogo khozyaistva po organizatsii rabot "vakhtovym sposobom" pri uborke urozhaya v zone radioaktivnogo zagryazneniya. Ministerstvo zdoravookhraneniya SSSR. M.: Gosudarstvennyi agropromyshlenniy komitet SSSR, 1986. (In Russian)]
30. Prister B.S., Perepelyatnikov G.P., Perepelyatnikova L.V. Countermeasures used in the Ukraine to produce forage and animal food products with radionuclide levels below intervention limits after the Chernobyl accident // *Sci. Total Environ.* 1993. V. 137. P. 183–198.
31. Руководство по ведению сельского хозяйства в условиях радиоактивного загрязнения части территории РСФСР, Украинской ССР и Белорусской ССР на период 1988–1990 гг. / Под ред. Р.М. Алексахина. М.: Государственный Агропромышленный комитет СССР, 1988. 40 с. [Rukovodstvo po vedeniju sel'skogo hozjajstva v uslovijah radioaktivnogo zagrjaznenija chasti territorii RSFSR, Ukrainskoj SSR i Belorusskoj SSR na period 1988–1990 gg. / Pod red. R.M. Aleksahina. M.: Gosudarstvennyj Agropromyshlennyj komitet SSSR, 1988. 40 s. (In Russian)]
32. Рекомендации по ведению сельского хозяйства в условиях радиоактивного загрязнения территории в результате аварии на Чернобыльской АЭС на период 1991–1995 гг. / Под ред. Р.М. Алексахина. М.: Государственная комиссия Совета Министров СССР по продовольствию и закупкам, 1991. 57 с. [Recommendations on agriculture in conditions of radioactive contamination of the territory as a result of the Chernobyl accident for the period 1991–1995 gg. / Ed. R.M. Aleksakhin. M.: State Commission of the USSR Council of Ministers for Food and Procurement, 1991. 57 p. (In Russian)]
33. Ведение личного подсобного хозяйства на территории, загрязненной радиоактивными веществами. Государственная комиссия Совета Министров СССР по продовольствию и закупкам Главгробропром. Обнинск: ВНИИСХРАЭ РАСХН, 1991. 22 с. [Vedenie lichnogo podsobnogo hozjajstva na territorii, zagrjaznennoj radioaktivnymi veshhestvami. Gosudarstvennaja komissija Soveta Ministrov SSSR po prodovol'stviju i zakupkam Glavagrobioprom. Obninsk: VNIISHRAJe RASHN, 1991. 22 s. (In Russian)]
34. Рекомендации по ведению растениеводства на радиоактивно загрязненных территориях России. ВНИИСХРАЭ. М.: РАСХН, 1997. 115 с. [Rekomendacii po vedeniju rastenievodstva na radioaktivno zagrjaznennyh territorijah Rossii. VNIISHRAJe. M.: RASHN, 1997. 40 s. (In Russian)]
35. Сборник нормативных и методических документов, регламентирующих ведение сельского хозяйства на территориях, подвергшихся радиоактивному загрязнению в результате аварии на Чернобыльской АЭС (в 3 т.) / Под ред. Н.И. Санжаровой. Обнинск: ГНУ ВНИИСХРАЭ, 2006. Т. 1: 1986–1989 – 433 с. Т. 2: 1990–1997 – 381 с. Т. 3: 1998–2005 – 384 с. [Sbornik normativnyh i metodicheskikh dokumentov, reglamentirujushhij vedenie sel'skogo hozjajstva na territorijah, podvergshijsja radioaktivnomu zagrjazneniju v rezul'tate аварии na Chernobyl'skoj AJeS (v 3 t.) / Pod red. N.I. Sanzharovoj. Obninsk: GNU VNIISKHRAE, 2006. T. 1: 1986–1989 – 433 s. T. 2: 1990–1997 – 381 s. T. 3: 1998–2005 – 384 s. (In Russian)]
36. Санжарова Н.И., Кузнецов В.К., Исамов Н.Н. (мл.), и др. Рекомендации по ведению кормопроизводства на радиоактивно загрязненных сельскохозяйственных угодьях северной части лесостепной зоны. Обнинск: ВНИИСХРАЭ, 2009. 109 с. [Sanzharova N.I., Kuznecov V.K., Isamov N.N. (ml.), i dr. Rekomendacii po vedeniju kormoproizvodstva na radioaktivno zagrjaznennyh sel'skohozjajstvennyh ugod'jah severnoj chasti lesostepnoj zony. Obninsk: VNIISHRAJe, 2009. 109 s. (In Russian)]
37. Sanzharova N.I., Fesenko S.V., Kotik V.A., et al. Behaviour of radionuclides in meadows and efficiency of countermeasures // *Radiat. Prot. Dosim.* 1996. V. 64. № 1/2. P. 43–48.
38. Fesenko S.V., Alexakhin R.M., Sanzharova N.I. et al. Dynamics of ¹³⁷Cs concentration in agricultural products in areas of Russia contaminated as a result of the accident at the Chernobyl nuclear power plant // *Radiat. Prot. Dosim.* 1995. V. 60. № 2. P. 155–166.
39. Fesenko S.V., Colgan P.A., Sanzharova N.I. et al. The dynamics of the transfer of caesium-137 to animal fodder in areas of Russia affected by the Chernobyl accident and resulting doses from the consumption of milk and milk products // *Radiat. Prot. Dosim.* 1997. V. 69. № 4. P. 289–299.
40. Bogdevitch I., Putyatyn Yu., Rigney C. et al. Edible oil production from rapeseed grown on contaminated lands // *Westshopfugsketten in der Naturstoffverarbeitung: Innovations forum, 10 und 11 Dezember 2001.* Gardelegen, Germany, 2001. P. 148–156.
41. Фесенко С.В., Алексахин Р.М., Санжарова Н.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. 316–327. [Fesenko S.V., Alexakhin R.M., Sanzharova N.I. et al. Regularities on changes of ¹³⁷Cs concentrations in animal products in the territory of the Russian Federation subjected to contamination as a result of the Chernobyl accident // *Radiacionnaja biologija. Radiojekologija.* 1995. V. 35. № 3. P. 316–327. (In Russian)]
42. Ratnikov A.N., Vasiliev A.V., Krasnova E.G. et al. The use of hexacyanoferrates in different forms to reduce radiocaesium contamination of animal products in Russia // *Sci. Total Environ.* 1998. V. 223. P. 167–176.

43. *Jacob P., Fesenko S., Firsakova S.K. et al.* Remediation strategies for rural territories contaminated by the Chernobyl accident // *J. Environ. Radioact.* 2001. V. 56. P. 51–76.
44. *Панов А.В., Исамов Н.Н., Санжарова Н.И. и др.* Радиологический контроль продукции животноводства и кормопроизводства юго-западных районов Брянской области, подвергшихся воздействию аварии на ЧАЭС // *Рос. журн. Проблемы ветеринарной санитарии, гигиены и экологии.* 2015. № 4 (16). С. 91–99 [*Panov A.V., Isamov N.N., Sanzharova N.I. i dr.* Radiologicheskij kontrol' produkcii zhivotnovodstva i kormoproizvodstva jugo-zapadnyh rajonov Brjanskoj oblasti, podvergshihsjaz vozdjstviju avarii na ChAJeS // *Rossijskij zhurnal Problemy veterinarnoj sanitarii, gigieny i jekologii.* 2015. № 4 (16). P. 91–99 (In Russian)]
45. *Ulanovsky A., Jacob P., Fesenko S. et al.* ReSCA – Remediation strategies after the Chernobyl accident, Environmental Modelling and Software // *Radiat. Environ. Biophys.* 2011. V. 50. P. 67–83.
46. *Jacob P., Fesenko S., Bogdevitch I. et al.* Rural areas affected by the Chernobyl accident: Radiation exposure and remediation strategies // *Sci. Total Environ.* 2009. V. 408. P. 14–25.
47. ICRP, 2006. Assessing Dose of the Representative Person for the Purpose of the Radiation Protection of the Public. ICRP Publication 101a. Ann. ICRP 36 (3).
48. *Fesenko S., Jacob P., Ulanovsky A. et al.* Justification of remediation strategies in the long term after the Chernobyl accident // *J. Environ. Radioact.* 2013. V. 119. P. 39–47.
49. *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 [*Sanzharova N.I., Fesenko S.V., Romanovic I.K. et al.* Radiological Aspects of Transition of Russian Areas Affected by the Chernobyl Accident to Normal Activities // *Radiation Biology. Radioecology.* 2016. V. 56. № 2. P. 322–335 (In Russian)]

Accident at Chernobyl NPP: Countermeasures and Remedial Actions in Agriculture

S. V. Fesenko^{a, #}, N. I. Sanzharova^a, N. N. Isamov^a, and O. A. Shubina^a

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

[#] E-mail: corwin_17f@mail.ru

A wide range of countermeasures and remedial actions has been developed and used to mitigate the consequences of the Chernobyl accident. The article summarizes the basic information on the application of countermeasures in agriculture during the 35 years after the accident and provides data on their effectiveness. The experience in the application of agricultural remedial measures and their impact on the radiological situation in different periods after the accident are analysed. The most important aspects are highlighted and the need in using the experience gained in aftermath after the Chernobyl accident for the improvement of the emergency response in agriculture for potential emergencies is demonstrated.

Keywords: Chernobyl nuclear power plant, agriculture, consequences, countermeasures, remediation, public exposure