

УДК 504.055:574.631.95:539.163:614.876:621.039.58

АВАРИЙНОЕ РЕАГИРОВАНИЕ В АПК: РАДИОЭКОЛОГИЧЕСКИЕ УРОКИ КЫШТЫМСКОЙ АВАРИИ

© 2024 г. С. И. Спиридонов*, С. В. Фесенко

*Всероссийский научно-исследовательский институт радиологии и агроэкологии –
Национальный исследовательский центр «Курчатовский институт», Обнинск, Россия*

**E-mail: spiridonov.si@gmail.com*

Поступила в редакцию 04.05.2023 г.

После доработки 12.11.2023 г.

Принята к публикации 24.07.2024 г.

Описаны факторы, определяющие последствия аварии на химкомбинате «Маяк» для сельского хозяйства, и особенности формирования радиационной обстановки на загрязненной территории. Показано, что для обеспечения готовности к оперативному реагированию необходимы эффективная структура управления для принятия решений, наличие аварийных планов, прогностического расчетного инструментария и соответствующих нормативов для оперативного аварийного реагирования. Выполнен анализ защитных мероприятий, проведенных в различные периоды после Кыштымской аварии. Сформулированы уроки Кыштымской аварии, касающиеся готовности к аварийному реагированию, внедрения организационных, агрохимических, защитных мероприятий в АПК, а также использования накопленного опыта в науке и практике.

Ключевые слова: Кыштымская авария, система аварийного реагирования, Восточно-Уральский радиоактивный след, радионуклиды, дозы облучения населения, защитные мероприятия, сельскохозяйственные угодья

DOI: 10.31857/S0869803124050098, **EDN:** LNLHFW

Вопросы, связанные с анализом потенциального ущерба и устранения последствий для сельского хозяйства неконтролируемого поступления радионуклидов в окружающую среду, не теряют своей актуальности. Такого рода ситуации возможны в результате аварий на предприятиях атомной энергетики и промышленности, а также террористических актов на этих объектах. Вследствие этого подготовка к аварийному реагированию в сельском хозяйстве является проблемой, решение которой направлено на обеспечение экологической безопасности ядерной энергетики в целом [1–3].

Создание и совершенствование системы аварийного реагирования, в том числе и в агропромышленном комплексе (АПК), должно основываться на ретроспективном анализе опыта ликвидации последствий крупных радиационных аварий, прежде всего на Южном Урале, в Чернобыле и Фукусиме. Среди перечисленных радиационных катастроф мирового масштаба Южно-Уральская (Кыштымская) авария, произошедшая в 1957 г. на заводе по производству оружейного плутония (ПО «Маяк»), имеет особое значение.

Во-первых, эта авария имеет индекс 6 по 7-бальной международной шкале ядерных событий INES,

уступая только аварии на Чернобыльской АЭС. Во-вторых, Кыштымская авария явилась первой крупномасштабной радиационной катастрофой, ликвидация последствий которой была затруднена отсутствием опыта аварийного реагирования и применения защитных мероприятий. В-третьих, в течение длительного времени информация об аварии была недоступна для широкой общественности в силу режима секретности. Начиная с 90-х годов прошлого века были опубликованы статьи и монографии с характеристиками аварии на ПО «Маяк», анализом радиоэкологических и медицинских последствий, описанием применяемых контрмер [3–10]. В дополнение к этим публикациям представляется важным обобщить опыт ликвидации последствий Кыштымской аварии и представить его в виде кратких выводов, включающих критический анализ эффективности защитных мероприятий, в том числе в сфере агропроизводства.

Целью настоящей статьи являлся критический анализ особенностей аварийного реагирования после аварии на ПО «Маяк» и определение уроков этой аварии, полезных для совершенствования системы аварийного реагирования в сельском хозяйстве Российской Федерации.

ФАКТОРЫ, ОПРЕДЕЛЯЮЩИЕ ПОСЛЕДСТВИЯ АВАРИИ НА ХИМКОМБИНАТЕ «МАЯК» ДЛЯ СЕЛЬСКОГО ХОЗЯЙСТВА

Причиной Кыштымской аварии явился тепловой взрыв высокоактивного резервуара с жидкими отходами радиохимического производства ПО «Маяк». Продукты взрыва были подняты в воздух, подверглись рассеянию в атмосфере и осаждению на землю в направлении перемещения образовавшегося облака [11]. Взрывное облако содержало радиоактивные продукты деления, часть из которых поднялась на высоту 1000 м, при этом 90% радионуклидов осели на территории, прилегающей к источнику выброса [8]. Меньшее количество радионуклидов с активностью 74 ПБк (2 МКи) загрязнило территории ряда районов Челябинской, Свердловской и Тюменской областей, сформировав Восточно-Уральский радиоактивный след (ВУРС).

Анализ информации, представленной в [3–11], позволяет выделить совокупность разноплановых факторов, определяющих краткосрочные последствия аварии на химкомбинате «Маяк».

Высокая суммарная активность радионуклидов, поступивших в окружающую среду. В сферу взрыва было вовлечено около 740 ПБк (20 МКи) активности, 10% из которой выпало за пределами промышленной площадки. Как отмечено выше, согласно международной шкале INES Кыштымская авария относится к авариям 6-го уровня и сопоставима по своим масштабам с Чернобыльской катастрофой (7-й уровень), в результате которой в окружающую среду было выброшено 5300 ПБк.

Продолжительность выброса. В отличие от аварии на ЧАЭС с пролонгированными радиоактивными выпадениями, продолжавшимися около двух недель, выброс в результате аварии на химкомбинате «Маяк» носил практически разовый характер. Восточно-Уральский радиоактивный след был сформирован в течение короткого времени (10–11 ч).

Метеорологические условия в момент выброса. Радиоактивные вещества в виде жидкой пульпы были подняты на высоту 1–2 км и образовали радиоактивное облако, состоящее из жидких и твердых аэрозолей [5]. Метеоусловия благоприятствовали быстрому распространению облака. В районе выброса на высоте 10–12 м дул порывистый юго-западный ветер со скоростью 5 м/с, на высотах выше 500 м скорость ветра превышала 10 м/с. Особенности метеоусловий определили формирование радиоактивного следа в виде узкой полосы



Рис. 1. Карта-схема Восточно-Уральского радиоактивного следа. Числами обозначены изолинии начальной плотности загрязнения территории ^{90}Sr , Ки/км² (1 Ки/км² = 37 кБк/м²) [2].

Fig. 1. Map-Scheme of the East-Ural Radioactive Trace. Numbers indicate the isolines of the initial density of ^{90}Sr contamination, Ci/km^2 ($1 \text{ Ci}/\text{km}^2 = 37 \text{ kBq}/\text{m}^2$) [2].

(рис. 1) с максимальной длиной 300 км (при граничной плотности загрязнения по ^{90}Sr 3,7 кБк/м²).

Радионуклидный состав выброса. В составе радиоактивного выброса в результате Кыштымской аварии преобладали γ -излучающие радионуклиды с периодами полураспада несколько сотен и десятков суток, формирующие почти 95% суммарной активности продуктов взрыва [7]. Согласно экспериментальным и расчетным данным [5], процентные вклады этих радионуклидов в радиоактивное загрязнение территории следа варьируют в диапазонах 64–74% для $^{144}\text{Ce} + ^{144}\text{Pr}$, 3–10% для $^{106}\text{Ru} + ^{106}\text{Rh}$, 7–9% для $^{95}\text{Zr} + ^{95}\text{Nb}$. Следует отметить отсутствие короткоживущего ^{131}I , оказавшего существенное влияние на формирование краткосрочных последствий аварии на Чернобыльской АЭС.

Характер использования территории. Как отмечено выше, загрязненная территория широко использовалась для ведения сельскохозяйственной деятельности. Эта особенность определила необходимость применения защитных мероприятий, направленных на ограничение потребления населением загрязненной продукции АПК (забой скота, бракераж продовольствия и т.п.) [10].

Сезонный фактор. Кыштымская авария произошла осенью (29 сентября 1957 г.), после окончания вегетационного периода и завершения работ по уборке сельскохозяйственных культур. Альтернативная «весенняя ситуация» имела место во время чернобыльских выпадений.

Особенности формирования доз облучения населения. В первый год после аварии основным радиационным фактором для населения явилось внешнее γ -облучение всего тела и, после 2–3 месяцев, когда мощность дозы γ -излучения снизилась в 10 и более раз, внутреннее облучение желудочно-кишечного тракта. Особое значение с точки зрения формирования радиационных эффектов имело облучение костной ткани ^{90}Sr , поступавшего в организм пероральным путем [5].

В начальный период после аварийного выброса радиоактивное загрязнение окружающей среды определялось относительно короткоживущими радионуклидами, такими, как изотопы $^{95}\text{Zr}+^{95}\text{Nb}$, $^{106}\text{Ru}+^{106}\text{Rh}$, ^{125}Sb , $^{144}\text{Ce}+^{144}\text{Pr}$. Значительное снижение уровней суммарной активности содер-

жания радионуклидов в объектах окружающей среды отмечено в течение первого года после аварии (рис. 2).

В первый год после аварии основной вклад в загрязнение продукции АПК вносили ^{144}Ce и ^{95}Zr , за исключением молока, в котором 70% суммарной удельной активности формировал ^{90}Sr [6]. С течением времени концентрация радионуклидов снижалась во всех компонентах окружающей среды, включая продукцию агропромышленного производства, вследствие радиоактивного распада. К другим факторам, влияющим на загрязнение продукции АПК, можно отнести ветровую миграцию, водный сток, вертикальную миграцию в профиле почвы, а также убывание общего запаса радионуклидов в агроценозах в результате выноса радионуклидов с урожаем [3].

По прошествии 5–8 лет после аварии, в результате распада ^{95}Zr , ^{106}Ru и ^{144}Ce радиоактивное загрязнение определялось только ^{90}Sr и, в незначительной степени, ^{137}Cs . Через 10 лет после аварии годовое поступление $^{90}\text{Sr}+^{90}\text{Y}$ в организм человека с пищевым рационом, составленным из местных продуктов, почти на два порядка превышало значение этого показателя для ^{137}Cs [3]. Таким образом, наиболее радиологически значимым радионуклидом в составе радиоактивных выпадений в результате Кыштымской аварии являлся ^{90}Sr вследствие большого вклада в суммарную активность загрязнения окружающей среды в отдаленный период и повышенного накопления в объектах окружающей среды. Этот радионуклид рассматривался в качестве реперного по отношению к другим радионуклидам и использовался для выделения зон радиоактивного загрязнения.

Кыштымская авария в плане ликвидации ее последствий может рассматриваться как сельская авария, так как потребление пищевой продукции, содержащей радионуклиды, по истечении 1–2 лет после радиоактивных выпадений стало ведущим фактором облучения населения. В этой связи снижение доз внутреннего облучения от ^{90}Sr стало важнейшей целью, а ведение агропромышленного производства в условиях радиоактивного загрязнения – основным элементом реабилитации территорий.

Следует подчеркнуть, что ликвидация последствий аварии на химкомбинате «Маяк» осложнялась отсутствием разработанных защитных мероприятий, нормативов, отечественных и международных рекомендаций.

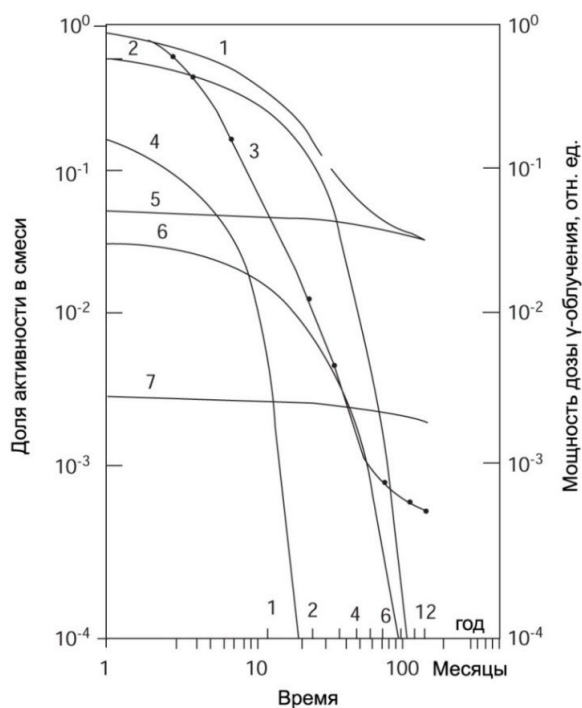


Рис 2. Изменение долей активности радионуклидов в выпавшей смеси продуктов Кыштымской аварии и динамика мощности экспозиционной дозы γ -излучения в течение первых 12 лет [2]: 1 – суммарная β -активность; 2 – активность $^{144}\text{Ce}+^{144}\text{Pr}$; 3 – мощность экспозиционной дозы; 4 – активность $^{95}\text{Zr}+^{95}\text{Nb}$; 5 – активность $^{90}\text{Sr}+^{90}\text{Y}$; 6 – активность $^{106}\text{Ru}+^{106}\text{Rh}$; 7 – активность ^{137}Cs .

Fig. 2. Changes in the activity fractions of radionuclides in the fallout mixture from the Kyshtym Accident and the dynamics of the gamma radiation exposure dose rate over the first 12 years [2]: 1 – total β -activity; 2 – activity of $^{144}\text{Ce}+^{144}\text{Pr}$; 3 – exposure dose rate; 4 – activity of $^{95}\text{Zr}+^{95}\text{Nb}$; 5 – activity of $^{90}\text{Sr}+^{90}\text{Y}$; 6 – activity of $^{106}\text{Ru}+^{106}\text{Rh}$; 7 – activity of ^{137}Cs .

Кыштымская авария инициировала появление в СССР новой научной дисциплины — радиоэкологии, способствовала развитию радиационной безопасности и радиационной медицины [3]. На наиболее загрязненной части радиоактивного следа в 1966 г. был создан Восточно-Уральский государственный заповедник с целью проведения полевых радиоэкологических исследований. Общая площадь заповедника составляет 16 616 га, протяженность по периметру — 90 км. Это был первый опыт в мире создания заповедника на территории, подвергшейся радиоактивному загрязнению. Таким образом, в течение нескольких десятилетий территория, загрязненная радионуклидами в результате Кыштымской аварии, являлась отечественной уникальной экспериментальной базой.

В арсенале радиоэкологии была накоплена обширная научная информация о поведении радиоэкологически значимых радионуклидов в окружающей среде, сопоставлены дозовые нагрузки на человека и природные объекты, оценена радиорезистентность природных экосистем, установлена нижняя граница возможного радиационного поражения на экосистемном уровне и т.д. В рамках решения прикладных задач на загрязненных в результате Кыштымской аварии территориях отработывался широкий набор агротехнических, агрохимических и зооветеринарных мероприятий, направленных на уменьшение накопления ^{90}Sr в сельскохозяйственной продукции.

В результате выполнения работ на территории Восточно-Уральского радиоактивного следа был накоплен уникальный разноплановый опыт, позволивший извлечь ряд важных уроков, относящихся как к радиоэкологическим ситуациям, подобным Кыштымской аварии, так и к общим вопросам аварийного реагирования.

УРОКИ АВАРИЙНОГО РЕАГИРОВАНИЯ ПОСЛЕ АВАРИИ НА ХИМКОМБИНАТЕ «МАЯК»

Урок 1. Система реагирования должна иметь эффективную структуру управления для принятия оперативных решений и разработки системы реабилитационных мероприятий по устранению последствий радиоактивного загрязнения окружающей среды, прежде всего сферы АПК. Основные черты управления при ликвидации последствий Кыштымской аварии — строгая вертикаль власти, исключая принятие принципиальных решений по защите населения на местном уровне. С одной стороны, такая централизация управления гарантировала

необходимое финансовое и ресурсное обеспечение защитных мер, а с другой стороны, приводила к задержке их реализации [3]. Оптимальная система аварийного реагирования в сельском хозяйстве должна обеспечивать возможность принятия неотложных решений на различных уровнях управления, в том числе и на региональном. Это возможно при соответствующей подготовке и информированности лиц, принимающих решения, и населения.

Урок 2. Основой для принятия решений о защитных мероприятиях как в начальный период после аварии, так и в отдаленный период должны являться результаты прогноза, а не только данные радиационного контроля [5]. В любой период аварийной ситуации первым этапом работ по обеспечению радиационной безопасности должны быть не только оценка, но и прогноз радиационной обстановки, который должен определить систему необходимых мер по реабилитации в АПК [10].

Урок 3. Для оценки последствий аварии и внедрения защитных мероприятий лица, принимающие решения, должны располагать необходимыми радиоэкологическими данными и моделями. Оправданием отсроченного отселения, а также недостаточной эффективности некоторых других контрмер служило отсутствие радиоэкологических данных для прогноза изменения радиационной обстановки и доз облучения населения. На момент аварии не были известны дозовые коэффициенты внешнего облучения человека от среды обитания, дозовые коэффициенты внутреннего облучения при поступлении радионуклидов через органы дыхания и пищеварения. Не было достоверной информации о предстоящем в течение первых лет после аварии изменении уровней годового поступления ^{90}Sr с пищевым рационом на территории следа с периодом полуснижения 8–12 лет [7].

Урок 4. Для оперативного принятия решений по ликвидации последствий аварии необходимо иметь «аварийный план», рассматривающий реагирование в АПК для различных сценариев развития аварии. Одной из причин того, что при ликвидации Кыштымской аварии в ряде случаев контрмеры не выполнялись своевременно или были неполными, было отсутствие аварийного плана. Для каждого ядерно-энергетического объекта должен быть разработан план на случай радиационной аварии и радиоактивного загрязнения территории. При планировании контрмер для начальной и промежуточной фаз послеварийного периода полезно задуматься над мерами и для поздней фазы [7].

Урок 5. *Оценка радиологической ситуации и принятие решений по внедрению защитных мероприятий в различные послеварийные периоды должны основываться на дозовых критериях и сопоставлении прогнозируемых дозовых нагрузок с этими критериями.* Эти критерии, являющиеся первичными в системе нормативов, позволяют разработать предельно допустимые уровни содержания основных дозообразующих радионуклидов в сельскохозяйственной продукции и предельные плотности загрязнения почв. Для оперативного управления и радиационного контроля в АПК должны быть разработаны производные уровни — допустимые уровни содержания радионуклидов в продукции, гарантирующие соблюдение дозовых пределов.

Урок 6. *Экстренная эвакуация населения в ранние сроки стала одной из самых эффективных контрмер,* значительно сократив внешнее облучение и прекратив поступление радионуклидов в организм с пищевым рационом. Следует отметить, что в начальный период в качестве цели отселения рассматривалось предотвращение внешнего облучения. К 1957 г., на основе опыта испытаний ядерного оружия, в Советском Союзе была достаточно хорошо развита система дозиметрического контроля, а также нормы и методы оценки доз γ -облучения населения. В то же время к этому моменту не существовало системы мер радиационной защиты населения от внутреннего облучения, за счет потребления загрязненных продуктов питания.

Ретроспективные оценки [7] показали, что эвакуация населения была очень эффективной мерой для предотвращения внутреннего облучения ЖКТ короткоживущими радионуклидами, преимущественно ^{144}Ce , вклад которого был ранее недооценен.

Урок 7. *Эффективность контрмер зависит от оперативности их внедрения.* Чем раньше они внедрены, тем больше снижение дозы от их внедрения. Доза, предотвращенная в результате плановой эвакуации, была существенно меньше дозы, предотвращенной в результате экстренной эвакуации. Это связано с тем, что дозовая нагрузка на население была сформирована в основном в первые месяцы после аварии преимущественно за счет короткоживущих радионуклидов, а не долгоживущего ^{90}Sr . Так, плановое отселение жителей, проживавших при начальной плотности загрязнения ^{90}Sr 2–6 Ки/км² (74–220 кБк/м²), явилось малоэффективным как по критерию предотвращенной дозы, так и по критерию «ущерб—польза» [7].

В то же время экстренную эвакуацию жителей деревень на расстоянии 12–22 км от ПО «Маяк»,

завершенную к 7–10-му дню после аварии, можно квалифицировать как эффективную защитную меру. Жители этих деревень (1383 человека) были вывезены на незагрязненную территорию и временно размещены в приспособленных помещениях. Люди прошли полную санитарную обработку с изъятием и уничтожением загрязненной личной одежды и обуви и заменой ее на новую. Впоследствии эвакуированное население было размещено на постоянное проживание в населенных пунктах за пределами загрязненной территории с возмещением государством всех убытков, причиненных населению [3].

Урок 8. *Радиационный контроль и выбраковка загрязненной продукции эффективны только при их введении в самые ранние сроки после аварии.* Промедление с внедрением этих контрмер после Кыштымской аварии существенно уменьшило их эффективность в снижении дозы облучения населения до уровня всего лишь нескольких процентов [7]. Уже с 1958 г. на загрязненной территории контроль качества и выбраковка сельскохозяйственной продукции были признаны малоэффективными мерами в связи с невозможностью осуществления контроля всей местной продукции и замены забракованной продукции «чистой» [3]. В связи с этим было принято решение о поэтапном отселении в течение 1958–1959 гг. жителей населенных пунктов с территории в границах плотности загрязнения 74–150 кБк/м² по ^{90}Sr .

Урок 9. *Режим ограничения доступа населения на загрязненную территорию и любой хозяйственной деятельности должен сопровождаться мероприятиями по контролю за его соблюдением.* Такой режим после образования ВУРС вводился поэтапно, и до отселения жителей они использовали традиционно привычную территорию, примыкающую к населенным пунктам в радиусе 5–10 км. Даже после установления режима ограничения население, не обеспеченное в силу секретности информацией о природе и степени радиационной опасности, продолжало использовать отчужденную территорию для своих нужд [7].

Систематический и достаточно широкий по охвату территории санитарно-радиационный и ветеринарно-радиационный контроль был налажен в 1960-х годах. Контролировались следующие показатели: уровни радиоактивного загрязнения территории и объектов окружающей среды, пищевых продуктов, мощность экспозиционной дозы γ -излучения, условия жизнедеятельности населения. Радиационно-санитарный и радиационно-ветеринарный контроль руководствовались в своей работе установленными допустимыми уровнями (ПДУ) радио-

активного загрязнения продукции. В случае превышения значений ПДУ принимались меры по изъятию из использования забракованной продукции или ее уничтожению [3].

Урок 10. *Необходимость дезактивации сельскохозяйственных угодий для предотвращения ветрового переноса радионуклидов за пределы отчужденной территории должна обосновываться с учетом специфики радиэкологической ситуации.* Эта контрмера должна носить своевременный характер. Дезактивация территории ВУРС в 1958–1959 гг. путем вспашки в границах плотности загрязнения ^{90}Sr 2 Ки/км² признана малоэффективной. Ветровой подъем с наиболее загрязненных территорий в головной части следа был ощутим только осенью 1957 г. и весной 1958 г., а вспашка была начата после значительного ослабления интенсивности этого фактора естественной миграции радионуклидов [7].

Непосредственная дезактивация сельскохозяйственных угодий хорошо зарекомендовала себя на небольших площадях, когда удалялся верхний загрязненный слой почвы с помощью землеройных и почво-перемещающих машин (бульдозеров, грейдеров, скреперов) с последующим захоронением в специальных могильниках. Дезактивационный эффект глубокой вспашки можно усилить систематическим внесением в пахотный слой почвы минеральных удобрений, которые локализуют корневые системы в незагрязненном слое. Этот прием, широко внедренный на практике, снижал содержание ^{90}Sr в урожае до 10 раз в сравнение с обычной вспашкой. Дорогостоящий метод, такой как удаление и утилизация верхнего загрязненного 5–10 см слоя почвы (соскоб), позволяет добиться 5–15-кратного снижения переноса ^{90}Sr на посевы, однако этот метод не получил широкого применения.

Урок 11. *При проведении зонирования загрязнённых территорий для целей защиты населения, оценки последствий аварии и применения защитных или реабилитационных мероприятий целесообразно выделить реперного радионуклида.* В этом качестве должен выбираться важный в радиологическом плане радионуклид с наибольшим периодом полураспада. Так, после аварии на химкомбинате «Маяк» оценена ведущая роль ^{90}Sr в облучении населения на протяжении позднего периода. Установление предельной плотности загрязнения территории ^{90}Sr , равной 2–4 Ки/км² (74–148 кБк/м²) и допускающей длительное и безопасное проживание населения, являлось безошибочным даже с современной точки зрения, если не учитывать дозу, полученную населением в первые месяцы после аварии [7].

Впервые в мировой практике были введены критерии предельно допустимого содержания ^{90}Sr в пищевых продуктах. С учетом того, что этот радионуклид является химическим аналогом Са (биологического носителя), был установлен предельный уровень 200 стронциевых единиц (1 стронциевая единица = 1 пКи ^{90}Sr / г Са). В дальнейшем этот предельный уровень был снижен в 3 раза и составил 66 стронциевых единиц. Впервые было установлено также предельно допустимое содержание ^{90}Sr в почве. На основе этого нормативного показателя органы здравоохранения давали разрешение на проживание на землях, подвергшихся радиоактивному загрязнению [2].

Урок 12. *Мероприятия по снижению содержания радионуклидов в сельскохозяйственной продукции носили исключительно важный характер с точки зрения смягчения последствий аварии на Южном Урале.* Это касается в первую очередь промежуточного (1–2 года после радиоактивного выброса) и долгосрочного периода после аварии. Существенная роль этих контрмер определяется тремя факторами [3]. Во-первых, важным вкладом внутреннего облучения в суммарную эффективную дозу. Во-вторых, тем, что снижение внутреннего облучения достигается по экономическим причинам эффективнее. В-третьих, выполнение комплекса мер в АПК имеет положительное социально-психологическое значение, особенно для сельского населения.

Среди большого числа агрохимических приемов снижения перехода ^{90}Sr в растения наиболее широкое применение получили известкование почв и использование минеральных удобрений. Эти приемы улучшали физико-химические свойства почвы, что приводило к повышению плодородия почв, росту урожайности культур и снижению поступления радионуклидов в урожай. Внесение минеральных удобрений в сбалансированных нормах (по потребности растений в основных элементах минерального питания) приводило на серых лесных почвах и выщелоченных черноземах к уменьшению поступления ^{90}Sr в растения в 1,5–2 раза. Известкование кислых почв снижало поступление ^{90}Sr в растения до 3 раз. Уменьшение поступления ^{90}Sr с растениеводческой продукцией в организм человека и с кормом в организм животных достигалось за счет возделывания растений с минимальной концентрацией ^{90}Sr (подбора культур). Кратность различий в накоплении ^{90}Sr основными сельскохозяйственными культурами достигала 10 раз, а сортовая разница — до 58 раз [3].

Зоотехнические приемы снижения накопления ^{90}Sr в продукции животноводства в основном были связаны с подбором кормовых рационов с минимальным содержанием ^{90}Sr . Снижение поступления ^{90}Sr в организм сельскохозяйственных животных достигалось за счет введения в рацион кормовых минеральных добавок Са или увеличения вклада богатых Са кормов (например, бобовых культур). Этим способом концентрация ^{90}Sr в молоке уменьшилась в 10 раз, а если скот был предназначен к убою на мясо, то снижение содержания ^{90}Sr обеспечивалось предварительной его выдержкой на «чистых» или менее загрязненных кормах. Значительные возможности производства сельскохозяйственной продукции с пониженной концентрацией ^{90}Sr имеются при применении технологических приемов первичной переработки сельскохозяйственного сырья. Наибольшее распространение получила переработка молока на молочнокислые продукты и масло, при которой концентрация ^{90}Sr в масле может быть в 20 раз ниже, чем в молоке. Общепринятая переработка зерна в муку и крупу обеспечивает уменьшение концентрации ^{90}Sr в конечных продуктах до 2–3 раз [3]. Практически чистыми по радиоактивности можно получить крахмал и спирт, а также растительное масло из загрязненной первичной сельскохозяйственной продукции.

Урок 13. *Активная информационная политика среди населения является важным и необходимым элементом аварийного реагирования.* В течение длительного времени информация о Кыштымской аварии скрывалась официальными властями от населения страны. Факт взрыва на химкомбинате «Маяк» впервые подтвердили в июле 1989 г. на сессии Верховного Совета СССР. В ноябре 1989 г. международная научная общественность была ознакомлена с данными о причинах, характеристиках, радиоэкологических последствиях аварии на симпозиуме Международного агентства по атомной энергии. На этом симпозиуме с основными докладами об аварии выступали ученые и специалисты химкомбината «Маяк». В период с 1990 г. по настоящее время опубликован ряд научных трудов (статей и монографий), посвященных анализу экологических и медицинских последствий Кыштымской аварии, а также обобщению накопленного опыта по ликвидации этих последствий [3–10].

На основе анализа опыта ликвидации последствий Кыштымской аварии можно сделать вывод о том, что радиационная защита является важным, но далеко не единственным аспектом деятельности после аварии. Важным элементом этой деятельности

представляется активная информационная и разъяснительная политика среди населения и социально активных слоев общества [3].

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В результате ликвидации последствий Кыштымской аварии впервые в мире был приобретен масштабный опыт, представляющий ценность как для нашей страны, так и для всех государств, использующих и развивающих ядерные технологии. Руководство страны и атомной отрасли обратили серьезное внимание на разработку комплекса мер, нацеленных на безопасную эксплуатацию ядерно-энергетических объектов (включая пункты хранения радиоактивных отходов) — источников потенциального радиационного воздействия на население и окружающую среду [12]. Приобретенный опыт был использован при ликвидации последующих крупных радиационных аварий, таких как авария на Чернобыльской АЭС и АЭС «Фукусима».

Так, анализ последствий Кыштымской аварии продемонстрировал первостепенную значимость защитных мероприятий в сельском хозяйстве, позволяющих уменьшить дозу внутреннего облучения населения. В результате применения такого рода мероприятий после аварии на Чернобыльской АЭС удалось значительно снизить дозу от употребления загрязненной агропродукции и, тем самым, суммарную дозовую нагрузку на население [8]. Снижение дозы внутреннего облучения потребовало существенно меньших затрат по сравнению с затратами на уменьшение дозы внешнего облучения [2]. Однако следует отметить, что даже по прошествии длительного времени после чернобыльской аварии необходимость создания эффективной системы аварийного реагирования в АПК России (урок 1) не снимается с повестки дня. Формирование такой системы целесообразно в рамках Минсельхоза России, что позволит разрабатывать и внедрять, в случае необходимости, оперативные и реабилитационные мероприятия с участием специалистов соответствующего профиля.

Описанные в настоящей статье уроки Кыштымской аварии касаются двух аспектов, имеющих первостепенную значимость при разработке системы аварийного реагирования в сельском хозяйстве Российской Федерации. К ним относится обеспечение возможности адекватной оценки послеаварийной ситуации и формирование набора контрмер для острого и долгосрочного периода, позволяющих разрабатывать стратегии их применения в конкретных условиях. Показано, что перманентная готов-

ность к оперативному реагированию возможна только при наличии эффективной структуры «аварийного управления» в АПК, аварийного плана, соответствующего инструментария (прогностических расчетных средств), параметрической базы, дозовых критериев и производных нормативов. Перечисленные выше компоненты системы аварийного реагирования в сельском хозяйстве могут обеспечить оперативное и эффективное применение мероприятий по защите населения.

ФИНАНСИРОВАНИЕ

Данные исследования выполнены в рамках фундаментальных и прикладных исследований по Программе деятельности Федерального государственного бюджетного учреждения «Национальный исследовательский центр «Курчатовский институт» на 2023–2027 гг. (комплексная тема «Прикладные генетические и биотехнологические исследования для сельского хозяйства»).

КОНФЛИКТ ИНТЕРЕСОВ

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов, связанных с публикацией статьи.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Алексахин Р.М. Радиоэкологические уроки Чернобыля. *Радиобиология*. 1993;33(1):3–14. [Alexakhin R.M. Radioecological lessons of Chernobyl. *Radiation Biology. Radioecology*. 1993;33(1):3–14. (In Russ.)]
2. Alexakhin R.M., Fesenko S.V., Sanzharova N.I. Serious radiation accidents and the radiological impact on agriculture. *Radiat. Prot. Dosim.* 1996;64(1/2):37–42.
3. Алексахин Р.М., Булдаков Л.А., Губанов В.А. и др. Крупные радиационные аварии: последствия и защитные меры. М.: ИздАт, 2001, 752 с. [Alexakhin R.M., Buldakov L.A., Gubanov V.A. et al. *Kрупные радиационные аварии: posledstvija i zashhitnye меры* = Major radiation accidents: consequences and protection measures. Moskva: IzdAt, 2001, 752 p. (In Russ.)]
4. Никипелов Г.Н., Романов Г.Н., Булдаков Л.А. и др. Радиационная авария на Южном Урале в 1957 г. *Атомная энергия*, 1989;67(2):74–80. [Nikipelov G.N., Romanov G.N., Buldakov L.A. et al. Radiation accident on South Urals in 1957. *Atomic Energy*. 1989;67(2):74–80. (In Russ.)]
5. Итоги изучения и опыт ликвидации аварийного загрязнения территории продуктами деления урана. Под ред. А.И. Бурназяна. М.: Энергоатомиздат, 1990, 144 с. [Itogi izuchenija i opyt likvidacii avarijnogo zagriznenija territorii produktami delenija urana = Results of the study and experience of eliminating accidental contamination of the territory with uranium fission products. Ed. by A.I. Burnazjan. Moscow: Energoatomizdat, 1990. 144 p. (In Russ.)]
6. Экологические последствия радиоактивного загрязнения на Южном Урале. Под ред. В.Е. Соколова и Д.А. Кривошукского. М.: Наука, 1993, 336 с. [Jekologicheskie posledstvija radioaktivnogo zagriznenija na Juzhnom Urale = Ecological consequences of radioactive contamination in the Southern Urals. Ed. by V.E. Sokolov and D.A. Krivoluckij. Moscow: Nauka, 1993, 336 p. (In Russ.)]
7. Романов Г.Н. Радиационная авария на ПО «Маяк»: практика контрмер, их эффективность и извлеченные уроки. *Вопр. радиац. безопасности*, 1997;3:3–17. [Romanov G.N. Radiacionnaja avarija na PO «Majak»: praktika kontrmer, ih jeffektivnost' i izvlechennye uroki = Radiation accident at Mayak: practice of countermeasures, their effectiveness and lessons learned. *Voprosy radiacionnoj bezopasnosti* = Radiation safety issues. 1997;3:3–17. (In Russ.)]
8. Remediation of contaminated environments. Ed. by G. Voight and S. Fesenko. Elsevier, 2009, 477 p.
9. Экологические и медицинские последствия радиационной аварии 1957 года на ПО «Маяк». Под ред. А.В. Аклеева и М.Ф. Киселева. М.: Министерство здравоохранения РФ, 2001. 294 с. [Jekologicheskie i medicinskie posledstvija radiacionnoj avarii 1957 goda na PO «Majak» = Environmental and health consequences of the 1957 radiation accident at the Mayak Production Association. A.V. Akleeva and M.F. Kiseleva (Eds). Moscow: Ministry of Health of the RF, 2001, 294 p. (In Russ.)]
10. Восточно-Уральский радиоактивный след (сборник статей, посвященных последствиям аварии 1957 года на ПО «Маяк»). Под ред. А.В. Аклеева и М.Ф. Киселева. Челябинск, 2012. 352 с. [Vostochno-Ural'skij radioaktivnyj sled (sbornik statej, posvjashhennyh posledstvijam avarii 1957 goda na PO «Majak») = The East Ural Radioactive Trace (a collection of articles devoted to the consequences of the 1957 accident at the Mayak Production Association). Pod red. A.V. Akleev and M.F. Kiselev (Eds). Cheljabinsk, 2012, 352 p. (In Russ.)]
11. Расчетное моделирование формирования Восточно-Уральского радиоактивного следа. Отчет о НИР. Науч. рук. М.И. Авраменко. РФЯЦ-ВНИИТФ, 1998. [Raschetnoe modelirovanie formirovanija Vostochno-Ural'skogo radioaktivnogo sleda. Otchet o NIR = Calculation modeling of the formation of the East Ural radioactive trace. Research report. Chief researcher M.I. Avramenko. RFJaC-VNIITF, 1998. (In Russ.)]
12. Толстиков В.С., Кузнецов В.Н. Ядерное наследие на Урале: исторические оценки и документы. Екатеринбург: Банк культурной информации, 2017. 400 с. [Tolstikov V.S., Kuznecov V.N. *Jadernoe nasledie na Urale: istoricheskie ocenki i dokumenty* = Nuclear Legacy in the Urals: Historical Assessments and Documents. Ekaterinburg: Bank kul'turnoj informacii, 2017. 400 p. (In Russ.)]

Emergency Response in Agricultural Industry: Radioecological Lessons from the Kyshtym Accident

S. I. Spiridonov*, S. V. Fesenko

*Russian Institute of Radiology and Agroecology
of National Research Centre «Kurchatov Institute», Obninsk, Russian Federation,
E-mail: spiridonov.si@gmail.com

The study outlines the various factors that determine the impact of the accident at the “Mayak” chemical plant on agriculture as well as the unique characteristics of the radiation levels in the affected region. In order to guarantee preparedness for any operational response, it is crucial to establish an efficient management structure that can make swift and well-informed decisions. Additionally, having access to emergency plans, prognostic calculation tools, and suitable protocols for handling emergencies are equally essential. These crucial elements are all necessary to ensure that any unexpected event can be addressed promptly and effectively. An analysis of protective measures taken at various times after the Kyshtym accident has been carried out. The paper presents the formulated key takeaways from the Kyshtym accident that pertain to emergency preparedness, the execution of organizational and agrochemical protective measures in agricultural production, and the utilization of accumulated knowledge in both science and practical applications.

Keywords: Kyshtym accident, emergency response system, East Ural radioactive trace, radionuclides, population radiation doses, protective measures, agricultural lands

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

Спиридонов Сергей Иннокентьевич, ORCID: 0000-0002-4320-1254, Всероссийский научно-исследовательский институт радиологии и агроэкологии Национального исследовательского центра «Курчатовский институт», г. Обнинск, Российская Федерация;
e-mail: spiridonov.si@gmail.com

Фесенко Сергей Викторович, ORCID: 0000-0003-1238-3689, Всероссийский научно-исследовательский институт радиологии и агроэкологии Национального исследовательского центра «Курчатовский институт», г. Обнинск, Российская Федерация;
e-mail: corwin_17f@mail.ru

Spiridonov Sergey Innokentievich, ORCID: 0000-0002-4320-1254, Russian Institute of Radiology and Agroecology of National Research Centre «Kurchatov Institute», Obninsk, Russian Federation;
e-mail: spiridonov.si@gmail.com

Fesenko Sergey Viktorovich, ORCID: 0000-0003-1238-3689, Russian Institute of Radiology and Agroecology of National Research Centre «Kurchatov Institute», Obninsk, Russian Federation;
e-mail: corwin_17f@mail.ru