

АНАЛИЗ ОПЫТА ОРГАНИЗАЦИИ РАДИАЦИОННО-ЭКОЛОГИЧЕСКОГО МОНИТОРИНГА ПОСЛЕ КРУПНЫХ РАДИАЦИОННЫХ АВАРИЙ (ОБЗОР)

Р.А. Микаилова, В.Э. Нуштаева, А.В. Панов*, С.И. Спиридонов

ФГБНУ «Всероссийский научно-исследовательский институт радиологии и агроэкологии»,
Россия, 249032, Калужская обл., г. Обнинск, Киевское шоссе, 109 км;

* адрес для переписки: *riar@mail.ru*

Реферат. В работе представлено становление подходов к организации и проведению радиационно-экологического мониторинга территорий, подвергшихся крупномасштабному радиоактивному загрязнению. На примере трех наиболее крупных в истории ядерной энергетики радиационных аварий – на ПО «Маяк», Чернобыльской АЭС и АЭС «Фукусима-1» – дан сравнительный анализ особенностей развития радиационной ситуации, предпринимаемых мер для ее оценки и прогнозирования, а также подходов к обеспечению радиационной безопасности населения. Дана краткая характеристика разработанных после аварий систем ведения радиационно-экологического мониторинга и контроля атмосферного воздуха, наземных и водных экосистем, сельскохозяйственной и пищевой продукции в различных зонах радиоактивного загрязнения. Выделены ключевые факторы, определяющие задачи и объекты радиационно-экологического мониторинга, а также общие черты и особенности его проведения в различные периоды после аварийных выбросов радионуклидов (острый, промежуточный, восстановительный). Показано, что для обеспечения радиационной безопасности населения в случае радиационной аварии, необходимо проведение радиационно-экологического мониторинга с учетом радиоизотопного состава выбросов и сбросов, путей миграции радионуклидов и особенностей их поведения в окружающей среде в зависимости от источника загрязнения и природно-климатических условий. Отмечена важность организации радиационного контроля объектов окружающей среды и пищевой продукции сразу после аварии и учета всего комплекса путей поступления радионуклидов в организм человека с целью обеспечения радиационной безопасности населения на пострадавших территориях.

Ключевые слова. ПО «Маяк», Чернобыльская АЭС, АЭС «Фукусима-1», радионуклиды, радиоактивное загрязнение, радиационный контроль, облучение населения, радиационная безопасность, реабилитация территорий.

Введение

История развития атомной энергетики, несмотря на постоянные работы по совершенствованию систем физической защиты и радиационной безопасности ядерных установок, сопровождалась как серьезными авариями (например, на радиохимическом предприятии в Уиндскейле, экспериментальном реакторе в Айдахо, АЭС «Три Майл Айленд»), так и крупномасштабными радиационными катастрофами: на ПО «Маяк», Чернобыльской АЭС и АЭС «Фукусима-1» (Крупные радиационные аварии ..., 2001; Авария на АЭС «Фукусима-1» ..., 2012). Глобальное и локальное загрязнение радионуклидами окружающей среды в результате радиационных аварий и инцидентов определило необходимость создания системы радиационно-экологического мониторинга (РЭМ) и прогнозирования последствий радиационного воздействия на человека и биоту с целью предотвращения необратимых изменений в состоянии биосферы и здоровья населения. Информация о характеристиках загрязнения радионуклидами окружающей среды (атмосферного воздуха, наземных и водных экосистем), полученная в результате мониторинга, является базой для принятия решений о проведении защитных и реабилитационных мероприятий по преодолению последствий радиационного загрязнения территорий и их возврата к условиям нормальной жизнедеятельности (Алексахин и др., 2003).

Последствия от поступления радионуклидов в окружающую среду при радиационных авариях зависят от ряда факторов: длительности выброса, активности и изотопного состава радионуклидов, метеорологических условий в период аварии, времени года (определяющего стадию развития растений и особенностей ведения сельскохозяйственного производства), характеристик окружающей среды региона воздействия, а также плотности населения и образа его жизни в пострадавших районах, видов и объемов проводимых защитных и реабилитационных мероприятий.

Радиационно-экологический мониторинг, т.е. система регулярных наблюдений за показателями радиоактивного загрязнения окружающей среды с целью оперативного выявления и прогноза негативных для человека и экосистем последствий, осуществляется как при штатной эксплуатации радиационно-опасных объектов (РОО), так и при аварийных ситуациях. Данные мониторинга обеспечивают информационную поддержку процессов принятия управленческих решений по обеспечению радиационной безопасности персонала, населения и биоты.

Радиационно-экологический мониторинг при эксплуатации РОО в штатном режиме состоит из нескольких подсистем: автоматизированный непрерывный контроль радиационной обстановки, периодический радиационный контроль и собственно подсистема радиоэкологического мониторинга. Круглосуточный контроль радиационной обстановки проводится в рамках единой Государственной автоматизированной системы мониторинга радиационной обстановки на территории Российской Федерации (ЕГАСМРО) и отраслевой автоматизированной системы контроля радиационной обстановки Государ-

ственной корпорации по атомной энергии «Росатом» (ОАСКРО) (Санжарова и др., 2019). Результаты мониторинга мощности дозы γ -излучения отображаются в реальном времени на сайтах ЕГАСМРО (ЕГАСМРО, 2020) и ОАСКРО (ОАСКРО, 2020) и позволяют оперативно принимать решения по обеспечению радиационной безопасности при внезапном ухудшении радиационной ситуации. Периодический радиационный контроль основан на отборе проб объектов окружающей среды, определении лабораторными методами содержания в них радионуклидов и измерениях радиационного фона на местности.

В случае радиационной аварии РЭМ проводится по особой программе и включает следующие основные задачи:

- систематические наблюдения за уровнями радиоактивного загрязнения природных сред с чувствительностью, позволяющей достоверно регистрировать глобальный радиационный фон;
- обнаружение радиоактивного загрязнения местности и природных сред в различных пунктах наблюдения (идентификация радиационной аварии);
- оценка уровней и масштабов радиоактивного загрязнения окружающей среды, определение радионуклидного состава загрязнения;
- контроль за динамикой уровней радиоактивного загрязнения окружающей среды;
- оценка радиационной опасности, возникшей в результате радиоактивного загрязнения и последствий этого загрязнения. Выявление приоритетности радионуклидов в составе загрязнения различных объектов окружающей среды с точки зрения их опасности;
- прогноз изменения радиационной обстановки и последствий радиоактивного загрязнения;
- сбор, обобщение и передача заинтересованным ведомствам информации о радиационной обстановке и состоянии окружающей среды в районе расположения аварийного объекта и о прогнозе ее изменения.

Развитие подходов к организации и проведению РЭМ шло на основе накопления данных и опыта при ликвидации последствий радиационных аварий. Целью настоящей работы является анализ систем мониторинга, созданных после наиболее крупных радиационных аварий (на ПО «Маяк», Чернобыльской АЭС и АЭС «Фукусима-1»), обобщение методологических подходов и методов его проведения в различные периоды после аварий (острый, промежуточный восстановительный).

Краткая характеристика радиационных аварий

Авария на ПО «Маяк» произошла 29 сентября 1957 г. недалеко от города Кыштым Челябинской области. В результате технической неисправности в системе охлаждения хранилища (бетонной емкости объемом 300 м^3) высокоактивных жидких отходов радиохимического производства, находившихся в виде нитратно-ацетатных соединений, произошел тепловой взрыв и выброс содержавшихся там радиоактивных веществ. Продукты взрыва были подняты в воздух, подверглись рассеиванию в атмосфере и осаждению на

поверхность земли из радиоактивного облака, перемещавшегося в северо-восточном направлении (Никипелов и др., 1989). Облако взрыва содержало радиоактивные продукты деления (^{144}Ce , ^{95}Zr , ^{106}Ru , ^{90}Sr) общей активностью около 740 ПБк (20 МКи). Часть радиоактивных веществ поднялась на высоту до 1 км, при этом 90% радионуклидов осело на территории, прилегающей к источнику выброса (Экологические последствия ..., 1993). В результате аварии ряд районов Челябинской (особенно Кунашакский и Каслинский), Свердловской и Тюменской областей оказались загрязнены радионуклидами с активностью 74 ПБк (2 МКи) (Итоги изучения ..., 1990). Сформировался радиоактивный след, известный как Восточно-Уральский радиоактивный след (ВУРС). Согласно 7-балльной международной шкале ядерных событий INES (International Nuclear Event Scale) эта авария имеет индекс 6 и была первой в мире наиболее крупной катастрофой с выбросом радионуклидов в окружающую среду.

Авария на Чернобыльской атомной электростанции (ЧАЭС), произошедшая 26 апреля 1986 г., признана крупнейшей техногенной катастрофой, которая в наибольшей степени повлияла на население и сельскохозяйственное производство Беларуси, России и Украины. В результате взрыва 4-го энергоблока атомной станции в ходе проведения эксперимента по оценке состояния и работоспособности реактора в случае нештатных ситуаций, произошел выброс в окружающую среду большого количества радионуклидов из числа продуктов деления, радионуклидов наведенной активности и невыгоревшего топливного материала в объеме – $1.85 \cdot 10^{18}$ Бк, 50 МКи (Информация об аварии ..., 1986; Израэль и др., 1987; Environmental Consequences ..., 2006).

По шкале INES эта авария имеет максимальный индекс – 7. В первый год после аварии наибольшую опасность и экологическую значимость представляли радионуклиды ^{131}I , ^{95}Zr , ^{106}Ru , ^{141}Ce , ^{144}Ce . В последующее время – ^{137}Cs , а для зоны, прилегающей к площадке ЧАЭС, – ^{90}Sr и ^{241}Pu . Динамические погодные условия привели к формированию нескольких радиоактивных следов, различающихся как протяженностью, так и в некоторой степени радионуклидным составом. На территории России максимальные уровни выпадений радиоизотопов были зафиксированы в юго-западных районах Брянской области – Гордеевский, Злынковский, Клинцовский, Красногорский, Новозыбковский. В несколько меньшей степени они затронули южные районы Калужской области (Жиздринский, Ульяновский, Хвостовичский) и ряд районов Тульской (Плавский) и Орловской (Болховский) областей (Атлас ..., 2009).

Третья крупная радиационная авария в истории ядерной энергетики произошла 11 марта 2011 г. на АЭС «Фукусима-1» в Японии в результате 9-балльного землетрясения и цунами в Тихом океане. По шкале INES эта авария также имеет индекс 7. Выброс радионуклидов осуществлялся из активной зоны энергоблоков 1, 2 и 3 атомной станции после отказов систем контроля топлива, защиты и работы реакторов или связанных с ними, вследствие зато-

пления. В результате аварии радиоактивные материалы поступили в окружающую среду либо контролируемым способом, то есть путем вентиляции первичной защитной оболочки реактора, либо неконтролируемым образом после повреждения и выхода из строя контейнмента и корпуса ядерного реактора №3 (Sources, Effects and Risks ..., 2014).

Согласно предварительным оценкам, выбросы ^{131}I и ^{137}Cs в атмосферу в результате аварии находились в пределах 90-700 ПБк и 7-50 ПБк, соответственно. Если исключить самые первые оценки, сделанные в марте – апреле 2011 года и основанные на очень ограниченной информации, доступной в то время, то диапазон становится более узким: 100-400 ПБк для ^{131}I и 7-20 ПБк для ^{137}Cs . Предварительные оценки характеристик выброса для ^{133}Xe варьировали от 500 до 15 тыс. ПБк. Однако в более поздних расчетах эта неопределенность уменьшилась и составила 6-12 тыс. ПБк (The Fukushima Daiichi accident ..., 2015b). В соответствии с Законом Японии о специальных мерах по обращению с радиоактивно загрязненными территориями, оценки эффективных доз населения, используемые для определения пострадавших от аварии районов, были выполнены консервативно, т.е. с коэффициентами запаса по критичным группам (Ministry of the Environment ..., 2011). Радиоактивно загрязненные участки классифицировались по двум категориям на основе дополнительной годовой эффективной дозы населения, оцененной осенью 2011 года: SDA (Special Decontamination Area) – особая зона дезактивации и ICSA (Intensive Contamination Survey Area) – зона интенсивного обследования загрязнения. Особая зона дезактивации включала в себя земли 11 муниципалитетов: города Нараха, Томиока, Окума, Футаба, Намие, деревню Кацурао и деревню Иитате, а также части муниципалитетов городов Тамура, Минамисома, Кавамата и деревни Каваути. В Зону интенсивного обследования загрязнения вошли те муниципалитеты, где дополнительная доза облучения населения в первый год оценивалась в пределах от 1 до 20 мЗв (The Fukushima Daiichi accident ..., 2015c).

В случае аварии на химкомбинате ПО «Маяк» краткосрочные радиологические последствия определялись изотопами ^{144}Ce , ^{95}Zr , ^{106}Ru , а долгосрочные – выпадениями ^{90}Sr . Для «реакторных» аварий (на Чернобыльской АЭС и АЭС «Фукусима-1»), наиболее важными дозообразующими радионуклидами являлись – ^{131}I , ^{134}Cs и ^{137}Cs . При этом краткосрочные эффекты определялись ^{131}I , а долгосрочные последствия – изотопами цезия (табл. 1). Авария на ЧАЭС имела самые масштабные последствия: выброс радиоактивного цезия в атмосферу был существенно выше, чем после аварии на АЭС «Фукусима-1». Более того, благоприятные метеорологические условия в момент Фукусимской аварии способствовали выпадению около половины радиоактивных веществ на поверхность океана, где они разбавлялись большими объемами воды и течениями, а также депонировались в донных отложениях.

Таблица 1. Основные характеристики радиационных аварий
(по данным *Итоги изучения ...*, 1990; *Environmental Consequences ...*, 2006;
The Fukushima Daiichi accident ..., 2015b; *The Fukushima Daiichi accident ...*, 2015c)

Показатель		Авария		
		ПО «Маяк»	Чернобыльская АЭС	АЭС «Фукусима-1»
Суммарная активность выброса		~ 740 ПБк	~ 14000 ПБк	~ 6128-13010 ПБк с учетом ^{133}Xe ~ 128-1010 ПБк без учета ^{133}Xe
Длительность выброса		1 день	~ 10 дней	Несколько недель
Площадь радиоактивного следа		23 тыс. км ²	191.56 тыс. км ²	~ 2 тыс. км ²
Время аварии		Сентябрь	Апрель-май	Март-апрель
Метеоусловия		Северо-восточное направление ветра	Переменное направление ветра	Переменное направление ветра
Природные условия		Равнина, лесные и аграрные экосистемы	Равнина, лесные и аграрные экосистемы	Горный, лесные экосистемы, побережье океана
Основные дозобразующие радионуклиды	Острый период	^{144}Ce	^{131}I	^{131}I
	Долго-срочный период	^{90}Sr	$^{134+137}\text{Cs}$	$^{134+137}\text{Cs}$

Проведение радиационно-экологического мониторинга после аварий

Авария на ПО «Маяк»

После аварии на ПО «Маяк» на территории радиоактивного следа общей площадью более 20 тыс. км² (в качестве границы следа рассматривалась плотность выпадений 3.7 кБк м⁻² по ^{90}Sr) находилось 217 населенных пунктов с общей численностью населения 270 тыс. человек. Радиоактивному загрязнению подверглись значительные площади сельскохозяйственных угодий. Определение размеров и плотности радиоактивного загрязнения территории явилось первоочередной задачей, обуславливающей порядок и характер мер по ликвидации последствий аварийного выброса. Первые рекогносцировочные работы по оценке радиационной обстановки были проведены сотрудниками ПО «Маяк» в течение суток после аварии. В район радиоактивного загрязнения была выслана автомобильная разведка с целью получения фактических данных об уровнях внешнего γ -излучения вблизи места аварии и в населенных пунктах. Был обследован район протяженностью до 50 км по ходу движения радиоактивного облака, определены ориентировочные гра-

ницы следа и измерены уровни внешнего γ -излучения в населенных пунктах региона аварии. Поскольку аварийный выброс радиоактивных продуктов произошел в конце сентября, когда часть урожая находилась на корню или не была вывезена с поля, а скот выпасался на лугах, то все объекты населенных пунктов, продукция сельскохозяйственного производства и животные оказались поверхностно загрязнены долгоживущей смесью осколков деления. Уровни радиоактивного загрязнения всех обследованных объектов достигали значительных величин, что потребовало дополнительных исследований в большинстве населенных пунктов (Итоги изучения ..., 1990).

Одной из важнейших задач острого периода после аварии на ПО «Маяк» являлось определение изотопного состава радионуклидов в продуктах питания, воде и фураже, что позволило выявить наиболее опасные в радиационном отношении изотопы, которые могут поступить в организм человека. Было установлено, что в первое время после аварии наибольший вклад в загрязнение сельскохозяйственной продукции вносили ^{144}Ce и ^{95}Zr , за исключением молока, в котором 70% суммарной активности формировал ^{90}Sr (Экологические и медицинские последствия ..., 2001). В дальнейшем данный вид мониторинга трансформировался в самостоятельное научное направление – радиационно-гигиенический мониторинг (РГМ), являющийся ключевым при обеспечении радиационной безопасности населения (Панов и др. ..., 2019).

Необходимыми и эффективными мерами по обеспечению радиационной безопасности населения после аварии на ПО «Маяк» стали контроль за уровнями радиоактивного загрязнения продовольствия, а также фуража и на его основе выбраковка части продукции, загрязнение которой превышало допустимое. При этом изъятая из использования продукция замещалась незагрязненным продовольствием. Выполнение этой задачи было поручено медицинской службе ПО «Маяк», а затем были созданы еще семь радиологических лабораторий в системе санитарно-эпидемиологических служб Челябинской и Свердловской областей (Крупные радиационные аварии ..., 2001).

К пятому-восьмому году (после завершения распада ^{95}Zr , ^{144}Ce , ^{106}Ru) радиоактивное загрязнение окружающей среды на ВУРСе было обусловлено только ^{90}Sr и ^{137}Cs , их содержание в природных компонентах медленно снижалось вследствие радиоактивного распада этих долгоживущих нуклидов. Помимо ослабевающего влияния физических процессов (ветровой миграции, водного стока, вертикальной миграции в профиле почвы), определенный вклад в снижение общего запаса радионуклидов в агроценозах вносило удаление его с массой урожая.

В 60-х годах начала действовать специальная служба радиационно-санитарного контроля в системе Челябинского и Свердловского Госсанэпиднадзора. Контролировались следующие показатели: уровни радиоактивного загрязнения территории населенных пунктов и объектов окружающей среды, пищевых продуктов, мощность экспозиционной дозы γ -излучения, условия жизнедеятельности населения. Тогда же была организована работа специальной лаборатории и отдела радиационно-ветеринарного контроля в системе Челябинского Госветнадзора. В его функции входили контроль за использова-

нием сельскохозяйственных угодий в составе санитарной зоны и систематическая оценка уровней загрязнения радионуклидами всех видов продукции агропромышленных предприятий (Крупные радиационные аварии ..., 2001).

На протяжении позднего периода после аварии (он продолжается и в настоящее время), за начало которого условно принято считать время отселения жителей с радиоактивно загрязненной территории, основным радиационным фактором стало внутреннее облучение от поступающего в организм населения ^{90}Sr . Вследствие большого периода полураспада ^{90}Sr основная задача этого этапа заключалась в обеспечении длительного и безопасного проживания не отселенных жителей. Условиями такой жизнедеятельности в сложившейся обстановке было соответствие международным и отечественным требованиям радиационной защиты населения и минимального вмешательства в привычный уклад его жизни. Обеспечение длительного и безопасного проживания населения на протяжении поздней фазы аварии достигалось за счет осуществления комплекса мер, направленных как на предотвращение повышенного, так и на снижение существующего радиоактивного загрязнения получаемой местной пищевой продукции при постоянном радиационно-санитарном контроле (Крупные радиационные аварии ..., 2001).

Необходимо отметить, что ко времени возникновения аварии на ПО «Маяк» наука располагала ограниченным объемом информации об особенностях формирования радиационной обстановки при загрязнении территории радиоактивными аэрозолями. Существовавшие принципы ограничения дозовых нагрузок на человека требовали усовершенствования, а сами нормативы нуждались в уточнении. Перечисленные обстоятельства не могли не сказаться на качестве и своевременности проведения некоторых защитных мер по обеспечению радиационной безопасности пострадавшего населения. На основе изучения и ликвидации последствий аварии на ПО «Маяк» был получен богатый опыт по организации радиационного контроля на загрязненной территории, что в свою очередь послужило стимулом для развития дозиметрии, создания серии приборов по прижизненным измерениям содержания в организме радиоактивных веществ и определению уровней внутреннего облучения человека (Итоги изучения ..., 1990).

В результате ликвидации последствий Кыштымской аварии – первой в мире крупной радиационной катастрофы – был приобретен масштабный опыт в организации радиационно-экологического мониторинга и отработке методов его проведения. 27 мая 1958 г. на территории ВУРС была создана Опытная научно-исследовательская станция (ОНИС), ставшая *alma mater* отечественной школы радиоэкологии. В задачи ОНИС, сформулированные научным руководителем станции академиком В.М. Ключевским, входили (Корнеев ..., 2013):

- изучение миграции радиоактивных веществ в условиях радиоактивного загрязнения территории;
 - изучение накопления радиоактивных веществ в сельскохозяйственных продуктах;
-

-
- разработка агротехнических приемов снижения накопления радиоактивных веществ в растениях;
 - рекомендации по сельскохозяйственному использованию радиоактивно загрязненных территорий;
 - изучение генетических последствий воздействия повышенного фона радиации на животных и растения в условиях радиоактивного загрязнения территории.

Исследования, проведенные на территории ВУРС, показали, что в любой послеаварийный период важным этапом мониторинговых работ должен быть прогноз радиационной обстановки. Для принятия решений о защитных мероприятиях в острый период и внедрении долгосрочных реабилитационных стратегий необходимы результаты прогноза, а не только данные радиационного контроля (Итоги изучения..., 1990). В этой связи была сформулирована необходимость разработки расчетного инструментария и соответствующей параметрической базы. Как отмечено в (Романов..., 1997), причиной отсроченного отселения, а также недостаточной эффективности некоторых других защитных и реабилитационных мероприятий явилось отсутствие радиэкологических данных для прогноза изменения радиационной обстановки и доз облучения населения.

В дальнейшем был сделан вывод о необходимости разработки системы государственного реагирования на радиационные аварии и стратегического аварийного плана. Отсутствие такого планирования явилось одной из причин того, что при ликвидации аварии на ПО «Маяк» в ряде случаев защитные мероприятия не выполнялись своевременно (Романов, 1997). Неотъемлемая компонента аварийного плана – программа радиационно-экологического мониторинга, включающего наблюдения, оценку текущей ситуации, прогнозирование, и анализ прогнозируемой ситуации. Эти этапы комплексного экологического мониторинга, как информационной системы, сформулированы академиком Ю.А. Израэлем в дочернобыльский период (Израэль, 1979).

Авария на Чернобыльской АЭС

Радиационное воздействие Чернобыльской аварии на окружающую среду было обнаружено радиометрической службой Госгидромета утром 26 апреля 1986 г. при проведении штатных наблюдений за мощностью экспозиционной дозы γ -излучения на площадке метеостанции в г. Чернобыле (Крупные радиационные аварии ..., 2001).

Фактически сразу после аварии была налажена и стала функционировать сеть мониторинга и радиационного контроля. 26 апреля, после сообщения Совета Министров СССР об аварии на Чернобыльской АЭС, с целью оценки радиационной обстановки, на вертолете были произведены замеры содержания радионуклидов в воздухе в районе г. Чернобыль (Израэль, 2006).

27-28 апреля на специально оборудованном самолете Ан-30Р были проведены измерения мощности γ -излучения в струе радиоактивных продуктов, выходящих из разрушенного реактора, на высоте до 1.5 км и расстоянии до 40-50 км, а также отобраны пробы на фильтры, установленные в гондолах.

Госкомгидрометом СССР в эти дни была организована аэрогаммасьемка всей европейской территории СССР (Чернобыль: Радиоактивное загрязнение ..., 1990). Первая карта-схема радиоактивного загрязнения земной поверхности была составлена 1 мая 1986 г. (Израэль, 2006).

В первые дни после аварии наибольшую радиологическую опасность представляли радиоизотопы йода. Основной перенос радиоактивных масс происходил на запад и северо-запад. В дальнейшем изменяющиеся метеорологические условия и смена направлений ветра на различных высотах, продолжение выбросов в течение 10 дней привели к весьма сложной картине загрязнения. В составе аварийных радиоактивных выпадений преобладали биологически очень подвижные ^{90}Sr , ^{131}I и ^{137}Cs , которые интенсивно мигрируют и накапливаются в сельскохозяйственной продукции. После распада ^{131}I и других короткоживущих радионуклидов с середины 1986 г. на большей части аварийного следа определяющими в загрязнении местности являлись ^{137}Cs и ^{134}Cs , а в некоторых районах ближе к АЭС также ^{90}Sr (Крышев, Рязанцев, 2017).

Наибольший объем работ по мониторингу радиационной обстановки был связан с получением информации о плотностях загрязнения радионуклидами населенных пунктов. К 1995 г. было обследовано около 11.6 тыс. пунктов в 23 областях России. В этих поселениях было отобрано около 90 тыс. проб почвы для спектрометрического анализа (Израэль, 2006).

Одним из наиболее тяжелых экологических последствий аварии на Чернобыльской АЭС явилось радиоактивное загрязнение сельскохозяйственных угодий, а также природных экосистем (лугов, пастбищ, лесов, водоемов и др.), определившее опасность поступления радионуклидов в организм человека. Эта опасность была обусловлена, в первую очередь, большим вкладом внутреннего облучения (связанного с потреблением загрязненных сельскохозяйственных продуктов, а также природных пищевых продуктов – грибов, рыбы, ягод, мяса диких животных и т.п.) в суммарную дозу облучения населения, проживающего на загрязненных территориях. Кроме того, проблема радиоактивного загрязнения была связана и с выпадениями радионуклидов на очень больших площадях, при этом плотности выпадений на значительных территориях оказались настолько высокими, что исключали использование производимой на них сельскохозяйственной продукции (Alexakhin, 1993; Крупные радиационные аварии ..., 2001; Панов и др., 2009).

С первых дней после аварии проводились первичные РЭМ и РГМ сферы сельскохозяйственного производства, которые включали оценку радионуклидного состава и плотностей загрязнения сельскохозяйственных угодий, определение радиологически значимых радионуклидов и критических пищевых продуктов. В последующее время в промежуточный период задачи РЭМ расширились, в него вошли: составление карт радиоактивного загрязнения сельскохозяйственных угодий, организация радиологического контроля сельскохозяйственной и пищевой продукции, а также сбор радиоэкологической информации о миграции радионуклидов по сельскохо-

зяйственным цепочкам (Алексахин и др., 2009; Санжарова и др., 2020). Особое внимание при этом было обращено на загрязнение сельскохозяйственной сферы биологически значимыми радионуклидами (^{90}Sr , ^{131}I , ^{134}Cs , ^{137}Cs , ^{239}Pu).

Первоначально в основу мониторинга легли данные аэрогаммасъемки и результаты измерений мощности экспозиционной дозы, при этом плотности выпадений оценивались, исходя из радионуклидного состава загрязнения. В дальнейшем результаты аэрогаммасъемки были дополнены наземными измерениями мощностей экспозиционных доз γ -излучения. Одновременно были начаты отбор проб и измерения содержания радионуклидов в основных сельскохозяйственных объектах – почвах, продукции растениеводства и животноводства. Объемы этих исследований в течение первых двух-трех лет после аварии непрерывно увеличивались. В конечном счете была организована разветвленная сеть радиологических лабораторий агрохимической и ветеринарной служб (Санжарова и др., 2020).

В системе Минсельхоза были организованы, оснащены современным оборудованием Ветеринарная радиологическая лаборатория в Брянской области, радиологические отделы ветеринарных лабораторий в Калужской, Орловской и Тульской областях, 6 Центров химизации и сельскохозяйственной радиологии. В тот же период проводилось оснащение современным оборудованием Центров и других подразделений Госсанэпиднадзора (в настоящее время это Роспотребнадзор Минздравсоцразвития России), обеспечивающих контроль радиоактивного загрязнения продуктов питания и питьевой воды. В системе Рослесхоза были организованы отделы (лаборатории) и посты радиационного контроля. С 1991 года ведется наблюдение на 13 стационарных участках, расположенных в различных зонах радиоактивного загрязнения и различных почвенно-климатических условиях. На этих участках отбираются образцы почв и продукции лесного хозяйства по 5 основным древесным породам: сосна, ель, береза, осина, дуб, а также дары леса, в основном грибы и ягоды (Санжарова и др., 2020; Марченко и др., 2020).

Результаты РЭМ зоны аварии на Чернобыльской АЭС продемонстрировали, что потребление пищи и воды, непосредственно загрязненных радионуклидами от выбросов (например, листовые овощи и дождевая вода) или через пищевую цепочку (например, молоко от животных, пасущихся на открытых пастбищах), может быть основным источником формирования дозы облучения населения в течение первых недель после аварийного выброса (International Advisory Committee ..., 1991).

Авария на АЭС «Фукусима-1»

Начиная с 15 марта 2011 г. РЭМ стал проводиться правительством префектуры Фукусима на основе разработанного ранее «Плана по ликвидации последствий стихийных бедствий». Результаты реализации программ РЭМ включали данные по уровням содержания радионуклидов, присутствующих в растительности, поверхностных водах и почвах на разном удалении и направлениях от аварийной АЭС (The Fukushima Daiichi accident ..., 2015a). Так, уже

вечером 15 марта были получены первые результаты измерений по содержанию ^{131}I и ^{137}Cs в растительности на расстоянии 35 км и 45 км от АЭС «Фукусима-1» (National Diet of Japan ..., 2012). Эти уровни были выше, чем временные нормативные значения, установленные Министерством здравоохранения, труда и благосостояния Японии.

Префектура Фукусима, столичное правительство Токио и префектуры Точиги, Ибараки и Гунма начали мониторинг продуктов питания и питьевой воды с 16 марта 2011 г. (The Fukushima Daiichi accident ..., 2015a). Эти меры были приняты в соответствии с указаниями Штаб-квартиры реагирования на ядерные аварийные ситуации. Они включали контроль за уровнями ^{137}Cs и ^{131}I в указанных компонентах питания населения. В случае превышения временно допустимых уровней, установленных Законом о пищевой санитарии, ограничивалось распространение и потребление этой загрязненной радионуклидами пищевой продукции. В течение нескольких недель после аварии уровни ^{131}I значительно снизились из-за его короткого периода полураспада, а пищевые ограничения в среднесрочной и долгосрочной перспективе стали основываться только на концентрации ^{137}Cs (The Fukushima Daiichi accident ..., 2015c).

В Российской Федерации с момента получения первой информации о радиационной аварии на АЭС «Фукусима-1» со значительным выбросом в окружающую среду техногенных радионуклидов, Роспотребнадзором были приняты срочные меры по обеспечению радиационной защиты населения Дальневосточного региона России: его службы были переведены в режим повышенной готовности, организован круглосуточный ежечасный мониторинг мощности дозы γ -излучения, увеличен объем радиационного контроля объектов окружающей среды (воздух, вода, почва). С момента получения информации о поступлении радиоактивных веществ в акваторию Тихого океана, также был усилен радиационный мониторинг рыбы и морепродуктов, вылавливаемых в районах потенциального радиоактивного загрязнения. Таким образом, был организован радиационный контроль на всех возможных путях поступления потоков радионуклидов от аварийной японской АЭС на территорию РФ (Онищенко и др., 2011; Авария на АЭС «Фукусима-1» ..., 2012).

В течение первых двух лет после аварии на АЭС «Фукусима-1» сбор радиационных показателей и радиэкологических данных включал: аэрогамма-съемку и измерение удельной активности ^{137}Cs в почве, воде, донных отложениях и продуктах питания, а также оценку индивидуальных доз облучения населения. Характеристика радиоактивно загрязненных районов в Японии привела к выделению областей, где содержание ^{137}Cs в пищевых продуктах может превышать принятые критерии радиационной безопасности. В зависимости от плотности радиоактивного загрязнения и дозовых нагрузок на население был применен соответствующий тип запрета, или реализована стратегия реабилитации территорий, пострадавших от аварии (The Fukushima Daiichi accident ..., 2015a).

Важность внешнего облучения человека в качестве основного пути воздействия после аварии на АЭС «Фукусима» оказала большое влияние на определение стратегий восстановления, применяемых в пострадавших районах. Дозы внутреннего облучения при приеме пищи, содержащей радионуклиды, были в значительной степени снижены благодаря обширной и всеобъемлющей программе радиационного мониторинга продуктов питания и ограничениям на продажу и распространение пищевой продукции с превышением радиологических стандартов (The Fukushima Daiichi accident ..., 2015a).

Результаты мониторинга мощности дозы γ -излучения и концентрации ^{137}Cs в пищевых продуктах, почве и других средах дали возможность пересмотреть и обновить планы реабилитации территорий, подвергшихся аварийным выпадениям. Мониторинг как плотности загрязнения радионуклидами, так и мощности доз в пострадавших от аварии районах, имел определяющее значение для принятия управленческих решений по выбору стратегии реабилитации. С целью максимально быстрого сбора данных мониторинга были разработаны и реализованы различные методы, такие как автомобильный и пеший мониторинг с переносными устройствами, мониторинг фиксированных точек с помощью портативных съемочных счетчиков и кодов прогнозирования эффективности дезактивации. Планирование дезактивации жилых районов было основано на точной и детальной характеристике γ -фона территории. Местные станции для мониторинга продуктов питания позволяли людям в пострадавших районах приносить пищевые продукты для измерения содержания ^{137}Cs . Кроме того, были также предоставлены средства для измерения содержания радионуклидов в теле человека (The Fukushima Daiichi accident ..., 2015a).

Особенности радиационно-экологического мониторинга в разные фазы аварии

Различия в рассмотренных системах РЭМ при ликвидации последствий крупных радиационных аварий обусловлены развитием научных знаний, технологической базы и накоплением опыта его проведения. Общими чертами радиационного мониторинга трех аварий является то, что в острую фазу в первую очередь необходимо было определение степени воздействия радиационного фактора на население, поэтому мониторинг был направлен на оценку радиоизотопного состава выпадений, дозовой нагрузки на население и масштабов загрязнения. Так, после аварии на ЧАЭС, острый период – это был период «йодной опасности», что позднее учитывалось во время преодоления последствий и организации мониторинговых работ в регионе аварии на АЭС «Фукусима-1». В средний и отдаленный период после аварий радиационно-экологический мониторинг направлен в большей степени на контроль за динамикой содержания радионуклидов в окружающей среде и сельскохозяйственной продукции, что является базой для обоснования и внедрения стратегий реабилитации пострадавших территорий (таблица 2).

Таблица 2. Основные характеристики радиационно-экологического мониторинга после крупномасштабных аварий

Период после аварии	Авария		
	ПО «Маяк»	Чернобыльская АЭС	АЭС «Фукусима-1»
Острый	γ- и β-съемка местности, контроль загрязнения радионуклидами продуктов питания.	Аэрогаммасъемка для оценки степени радиоактивного загрязнения территорий. Определение основных дозообразующих радионуклидов.	Определение уровней загрязнения радионуклидами объектов окружающей среды. Контроль уровней ^{131}I и $^{134,137}\text{Cs}$ в пищевой продукции.
Промежуточный	Определение уровней радиоактивного загрязнения территорий населенных пунктов, объектов окружающей среды и пищевых продуктов. Определение мощности дозы γ-излучения.	Разработка карт радиоактивного загрязнения сельскохозяйственных угодий, радиологический контроль сельскохозяйственной продукции, сбор информации по миграции радионуклидов в объектах окружающей среды.	Организация автомобильной сети радиационного мониторинга посредством использования переносных дозиметров. Организация стационарных точек измерения мощности дозы γ-излучения с помощью портативных счетчиков.
Восстановительный	Контроль уровней загрязнения ^{90}Sr объектов окружающей среды и продуктов питания. Измерение мощностей дозы γ-излучения.	Контроль уровней загрязнения ^{137}Cs объектов окружающей среды и продуктов питания. Измерение мощностей дозы γ-излучения.	Контроль уровней загрязнения изотопами Cs объектов окружающей среды и продуктов питания. Измерение мощностей дозы γ-излучения.

Заключение

Авария на ПО «Маяк» инициировала появление в СССР новой научной дисциплины – радиоэкологии, развитие которой способствовало формированию научной составляющей мониторинговых работ. Опыт организации радиационно-экологического мониторинга при ликвидации последствий аварии на ПО «Маяк» был позднее использован для территорий, подвергшихся загрязнению в результате аварий на Чернобыльской АЭС и АЭС «Фукусима».

С момента аварии в 1957 г. методологические подходы к проведению радиационно-экологического мониторинга постоянно развивались, начиная с использования радиометрического контроля за уровнями дозовых нагрузок и заканчивая организацией полномасштабной сети пунктов наблюдений за изменениями радиологической обстановки. Рассмотренные крупномасштабные аварии дали толчок к развитию радиометрического оборудования и оптимизации методик радиационно-экологического обследования территорий:

разработаны автоматизированные системы контроля радиационной обстановки, на международном и государственном уровнях регламентированы процедуры проведения мониторинговых работ.

Исходя из приведенного анализа опыта организации радиационно-экологического мониторинга можно выделить три основных периода после радиационной аварии:

- острый, в течение которого необходимо определить основной состав радиоактивного выброса и масштабы загрязнения, а также оценить пути поступления радионуклидов в организм человека (в ближней зоне аварии также и в организм сельскохозяйственных животных);

- промежуточный, в течение которого происходит организация основной сети радиационно-экологического мониторинга, включающей контроль загрязнения радионуклидами продуктов питания, определение мощности дозы γ -излучения и содержания радионуклидов в компонентах окружающей среды;

- восстановительный, когда в основном контролируется концентрация долгоживущих, наиболее радиологически значимых радионуклидов в компонентах окружающей среды и продуктах питания населения.

На ранней фазе аварии основными задачами радиационного контроля и мониторинга окружающей среды являются экспрессное определение характеристик выброса (сброса) и выноса радиоактивных веществ за пределы защитных барьеров, получение данных о метеорологической (гидрологической) обстановке в районе аварии, оценка мощности дозы γ -излучения на местности и объемной активности радионуклидов в приземном слое воздуха (воде). Решение этих задач может опираться на действующую в санитарно-защитной зоне и зоне наблюдения РОО стационарную ведомственную сеть наблюдений, а за ее пределами – территориальную гидрометеорологическую сеть, при поддержке санитарных служб и мобильных лабораторий (групп) радиационной разведки гражданской обороны.

В условиях внезапности и скоротечности аварийных событий наиболее ранняя информация (прежде всего о мощности дозы γ -излучения в районе аварии и в зоне наблюдения) вынужденно носит идентификационный (сигнальный) характер и предназначена, в первую очередь, для развертывания плана первоочередных защитных мероприятий в очаге аварии и в секторе распространения радиоактивных веществ, а также быстрой перестройки системы контроля от штатного к аварийному режиму.

В промежуточный и восстановительный периоды организуется сеть РЭМ, данные которого обеспечивают информационную поддержку процессов принятия управленческих решений по обеспечению радиационной безопасности населения. Таким образом, мониторинг радиационно-гигиенической и радиоэкологической обстановки также может трактоваться и как защитная мера, способствующая стабилизации социально-психологической обстановки за счет предоставления полной информации о ситуации. Актуальной задачей РЭМ для данных периодов также является разработка методов радиоэкологической оценки радиоактивно загрязненных территорий и прогнозирования

изменения на них радиационной обстановки с учетом вариабельности результатов мониторинга. Решение этой задачи должно основываться на синтезе разнородной радиоэкологической информации в рамках моделей и компьютерных систем, предназначенных для прогностических и сценарных системных исследований.

Работа выполнена при поддержке Российского научного фонда (грант №18-19-00016).

Список литературы

Авария на АЭС «Фукусима-1»: организация профилактических мероприятий, направленных на сохранение здоровья населения Российской Федерации. 2012. /Под ред. акад. РАМН Г.Г. Онищенко. – СПб., НИИРГ им. проф. П.В. Рамзаева, 336 с.

Алексахин Р.М., Санжарова Н.И., Панов А.В. 2009. Реабилитационные мероприятия в агропромышленном комплексе как основа социально-экономического развития территорий, подвергшихся воздействию аварии на Чернобыльской АЭС. – Вестник Российской академии сельскохозяйственных наук, № 6, с. 28-30.

Алексахин Р.М., Фесенко С.В., Санжарова Н.И., Ульяненко Л.Н., Филипас А.С., Панов А.В. 2003. Концепция реабилитации загрязнённых сельскохозяйственных угодий в отдалённый период после аварии на Чернобыльской АЭС. – Вестник Российской академии сельскохозяйственных наук, № 3, с. 14-17.

Атлас современных и прогнозных аспектов последствий аварии на Чернобыльской АЭС на пострадавших территориях России и Беларуси (АСПА Россия-Беларусь). 2009. /Под ред. Ю.А. Израэля и И.М. Богдевича. – Москва-Минск, 140 с.

ЕГАСМРО 2020. Единая Государственная автоматизированная система мониторинга радиационной обстановки на территории Российской Федерации. – Электронный ресурс. URL: <http://egasmro.ru/ru/> (дата обращения 08 сентября 2020).

Израэль Ю.А. 1979. Экология и контроль состояния природной среды. – Л., Гидрометеиздат, 375 с.

Израэль Ю.А. 2006. Радиоактивное загрязнение природных сред в результате аварии на Чернобыльской атомной станции. – М., Комтехпринт, 28 с.

Израэль Ю.А., Петров В.А., Авдюшин С.И., Гасилина Н.К., Ровинский Ф.Я., Ветров В.А., Вакуловский С.М. 1987. Радиоактивное загрязнение природных сред в зоне аварии на Чернобыльской АЭС. – Метеорология и гидрология, № 2, с. 5-18.

Информация об аварии на Чернобыльской АЭС и ее последствиях, подготовленная для МАГАТЭ. 1986. – Атомная энергия, т. 61, № 5, с. 301-320.

Итоги изучения и опыт ликвидации последствий аварийного загрязнения территории продуктами деления урана. 1990. /Под ред. А.И. Бурназяна. – М., Энергоатомиздат, 144 с.

Корнеев Н.А. К чистой среде, чистому миру и светлым помыслам (Комбинат «Маяк», ВУРС, ОНИС в памяти и сердце). 2013. – Обнинск, ВНИИСХРАЭ, 79 с.

Крупные радиационные аварии: последствия и защитные меры. 2001. /Под ред. акад. РАМН Л.А. Ильина, В.А. Губанова. – М., ИздАТ, 752 с.

Крышев И.И., Рязанцев Е.П. 2017. Экологический риск радиационных аварий на Чернобыльской АЭС и АЭС «Фукусима» (Япония). – Атомная энергия, т. 122, № 1, с. 46-55.

Марченко Т.А., Радин А.И., Раздайковин А.Н. 2020. Ретроспективное и современное состояние лесных территорий приграничных районов Брянской области, подвергшихся радиоактивному загрязнению. – Радиационная гигиена, т. 13, № 2, с. 6-18.

Никипелов Г.Н., Романов Г.Н., Булдаков Л.А., Бабаев Н.С., Холина Ю.Б., Микерин Е.И. 1989. Радиационная авария на Южном Урале в 1957 г. – Атомная энергия, т. 67, № 2, с. 74-80.

ОАСКРО, 2020. Радиационная обстановка на предприятиях Росатома. – Электронный ресурс. URL: <https://www.russian-atom.ru/> (дата обращения 08 сентября 2020).

Онищенко Г.Г., Романович И.К., Балонов М.И. 2011. Авария на АЭС «Фукусима-1»: первые итоги аварийного реагирования. Сообщение 1: общие сведения об аварии и радиационной обстановке. – Радиационная гигиена, т. 4, № 2, с. 5-12.

Панов А.В., Алексахин Р.М., Прудников П.В., Новиков А.А., Музалевская А.А. 2009. Влияние защитных мероприятий на накопление ^{137}Cs сельскохозяйственными растениями из почвы после аварии на Чернобыльской АЭС. – Почвоведение, № 4, с. 484-497.

Панов А.В., Санжарова Н.И., Кузнецов В.К., Спиридонов С.И., Курбаков Д.Н. 2019. Анализ подходов к радиационно-экологическому мониторингу в районах размещения ядерно- и радиационно-опасных объектов. Обзор. – Радиация и Риск, т. 28, № 3, с. 75-95.

Романов Г.Н. 1997. Радиационная авария на ПО «Маяк»: практика контрмер, их эффективность и извлеченные уроки. – Вопросы радиационной безопасности, № 3, с. 3-17.

Санжарова Н.И., Панов А.В., Кузнецов В.К., Исамов Н.Н., Карпенко Е.И., Гордиенко Е.В., Михайлова Р.А. 2019. Комплексный радиационно-экологический мониторинг в районе расположения радиационно-опасных объектов как составная часть Единой системы государственного экологического мониторинга. – Известия вузов. Ядерная энергетика, № 1, с. 131-142.

Санжарова Н.И., Ратников А.Н., Фесенко С.В., Панов А.В., Шубина О.А. 2020. Авария на Чернобыльской АЭС и проблемы реабилитации сельскохозяйственных территорий. – История науки и техники, № 7, с. 73-89.

Чернобыль: Радиоактивное загрязнение природных сред. 1990. /Под ред. Ю.А. Израэля. – Л., Гидрометеиздат, 296 с.

Экологические и медицинские последствия радиационной аварии 1957 года на ПО «Маяк». 2001. /Под ред. А.В. Аклеева и М.Ф. Киселева. – М., Министерство здравоохранения РФ, 294 с.

Экологические последствия радиоактивного загрязнения на Южном Урале. 1993. /Под ред. В.Е. Соколова и Д.А. Криволуцкого. – М., Наука, 336 с.

Alexakhin R.M. 1993. Countermeasures in agricultural production as an effective means of mitigating the radiological consequences of the Chernobyl accident. – Science of the Total Environment, vol. 137, pp. 9-20.

Environmental Consequences of the Chernobyl Accident and Their Remediation: Twenty Years of Experience. 2006. Rep. of the Chernobyl Forum Expert Group Environment. – IAEA, Vienna, 166 p.

International Advisory Committee, The International Chernobyl Project. 1991. Tech. Rep. – IAEA, Vienna, 640 p.

Ministry of the Environment, Act on Special Measures Concerning the Handling of Environmental Pollution by Radioactive Materials Discharged by the Nuclear Power Station Accident Associated with the Tohoku District – Off the Pacific Ocean Earthquake That Occurred on March 11, 2011, Act No. 110. 2011, Japan, 13 p.

National Diet of Japan Fukushima Nuclear Accident Independent Investigation Commission, The Official Report of The Fukushima Nuclear Accident Independent Investigation Commission 2012. – National Diet of Japan, Tokyo, 88 p.

Sources, Effects and Risks of Ionizing Radiation (Report to the General Assembly), UNSCEAR 2013 Report, Vol. I, Scientific Annex A: Levels and Effects of Radiation Exposure Due to the Nuclear Accident after the 2011 Great East-Japan Earthquake and Tsunami, Scientific Committee on the Effects of Atomic Radiation. 2014. – UNSCEAR, UN, New York, 311 p.

The Fukushima Daiichi accident. Technical volume 3. Emergency Preparedness and Response. 2015a. – IAEA, Vienna, 196 p.

The Fukushima Daiichi accident. Technical volume 4. Radiological consequences. 2015b. – IAEA, Vienna, 250 p.

The Fukushima Daiichi accident. Technical volume 5. Post-accident Recovery. 2015c. – IAEA, Vienna, 204 p. 08.09.2020 — 13.04.2021

Статья поступила в редакцию: 08.09.2020 г.

После переработки: 13.04.2021 г.

ANALYSIS OF THE EXPERIENCE IN ORGANIZING RADIOECOLOGICAL MONITORING AFTER MAJOR RADIATION ACCIDENTS (REVIEW)

R.A. Mikailova, V.E. Nushtaeva, A.V. Panov, S.I. Spiridonov*

Russian Institute of Radiology and Agroecology,
Kievskoe shosse, 109 km., 249032, Obninsk, Kaluga region, Russian Federation;
*corresponding author: *riar@mail.ru*

Abstract. The paper presents the development of approaches to the organization and conduct of radiation and environmental monitoring of territories subjected to large-scale radioactive contamination. Using the three most severe radiation accidents at the Mayak PA, the Chernobyl NPP and the Fukushima-1 NPP as the example, we made a comparative analysis of the radiation situation features, the measures taken to assess and predict it, as well as approaches to ensuring the radiation safety of the public. The review provides a brief description of the systems developed after accidents for conducting radiation and environmental monitoring and control of atmospheric air, terrestrial and aquatic ecosystems, agricultural and food products in various zones of radioactive contamination. The research highlights the key factors that determine the tasks and objects of radioecological monitoring, as well as the general features and peculiarities of its implementation in various periods (acute, intermediate, remediation) after accidental radionuclides' releases. It is shown that to ensure the radiation safety of the members of the public in case of a nuclear accident, it is necessary to conduct radioecological monitoring taking into account the radioisotope composition of emissions and discharges, migration routes of radionuclides and the peculiarities of their behavior in the environment, depending on the source of pollution and climatic factors. The research emphasizes the importance of organizing radiation monitoring of environmental objects and food products immediately after the accident and considering the entire complex of intake pathways of radionuclides by the human body in order to ensure the radiation safety of the population on the affected territories.

Keywords. Mayak PA, the Chernobyl NPP, the Fukushima-1 NPP, radionuclides, radioactive contamination, radiation control, irradiation of the population, radiation safety, land remediation

References

Avariya na AES «Fukushima-1»: organizatsiya profilakticheskikh meropriyatiy, napravlennykh na sokhraneniye zdorov'ya naseleniya Rossiyskoy Federatsii [The accident at the Fukushima-1 NPP: organization of preventive measures aimed at preserving the health of the population of the Russian Federation]. 2012. Saint Petersburg, 336 p.

Aleksakhin R.M., Sanzharova N.I., Panov A.V. 2009. Reabilitatsionnyye meropriyatiya v agropromyshlennom komplekse kak osnova sotsial'no-

ekonomicheskogo razvitiya territoriy, podvergshikhsya vozdeystviyu avarii na CHernobyl'skoy AES [Remediation measures in the agro-industrial complex as the basis for the socio-economic development of territories affected by the accident at the Chernobyl nuclear power plant]. *Vestnik Rossiyskoy akademii sel'skokhozyaystvennykh nauk – Bulletin of the Russian Academy of Agricultural Sciences*, no. 6, pp. 28-30.

Aleksakhin R.M., Fesenko S.V., Sanzharova N.I., Ulyanenko L.N., Filipas A.S., Panov A. V. 2003. Kontseptsii areabilitatsii zagryaznënykh sel'skohozaystvennykh ugodiy v otdalënnyy period posle avarii na CHernobyl'skoy AES [The concept of remediation of contaminated agricultural land in the remote period after the accident at the Chernobyl nuclear power plant]. *Vestnik Rossiyskoy akademii sel'skokhozyaystvennykh nauk – Bulletin of the Russian Academy of Agricultural Sciences*, no. 3, pp. 14-17.

Atlas sovremennykh i prognoznnykh aspektov posledstviy avarii na Chernobyl'skoy AES na postradavshikh territoriyakh Rossii i Belarusi (ASPA Rossiya-Belarus') [Atlas of modern and forecast aspects of the consequences of the accident at the Chernobyl nuclear power plant in the affected territories of Russia and Belarus (ASPA Russia-Belarus)]. 2009. Moscow-Minsk, 140 p.

Edinaya Gosudarstvennaya avtomatizirovannaya sistema monitoringa radiatsionnoy obstanovki na territorii Rossiyskoy Federatsii (EGASMRO) [Unified State Automated System for Monitoring the Radiation Situation in the Territory of the Russian Federation (EGASMRO)]. Elektronnyy resurs. URL: <http://egasmro.ru/ru/> (data obrashcheniya 08 sentyabrya 2020).

Izrael Yu.A. 1979. *Ekologiya i kontrol' sostoyaniya prirodnoi sredy* [Ecology and the control of the state of natural environment]. Leningrad, 375 p.

Izrael Yu.A. 2006. *Radioaktivnoye zagryazneniye prirodnnykh sred v rezul'tate avarii na CHernobyl'skoy atomnoy stantsii* [Radioactive contamination of natural environments as a result of the accident at the Chernobyl NPP]. Moscow, 28 p.

Izrael Yu.A., Petrov V.A., Avdyushin S.I., Gasilina N.K., Rovinsky F.Ya., Vetrov V.A., Vakulovsky S.M. 1987. Radioaktivnoye zagryazneniye prirodnnykh sred v zone avarii na CHernobyl'skoy AES [Radioactive contamination of natural environments in the accident zone at the Chernobyl nuclear power plant]. *Meteorologiya i gidrologiya – Meteorology and Hydrology*, no. 2, pp. 5-18.

Informatsiya ob avarii na CHernobyl'skoy AES i eye posledstviyakh, podgotovlennaya dlya MAGATE [Information on the accident at the Chernobyl NPP and its consequences, prepared for the IAEA]. 1986. *Atomnaya energiya – Atomic Energy*, vol. 61, no. 5, pp. 301-320.

Itogi izucheniya i opyt likvidatsii posledstviy avariynogo zagryazneniya territorii produktami deleniya urana [The results of the study and experience in eliminating the consequences of accidental pollution of the territory with uranium fission products]. 1990. Moscow, 144 p.

Korneev N.A. 2013. *K chistoy srede, chistomu miru i svetlym pomyslam (Kombinat «Mayak», VURS, ONIS v pamyati i serdtse)* [Towards a clean environment, a clean world and bright thoughts (Combine "Mayak", VURS, ONIS in memory and heart)]. Obninsk. 79 p.

Krupnyye radiatsionnyye avarii: posledstviya i zashchitnyye mery [Major radiation accidents: consequences and protective measures]. 2001. Moscow, 752 p.

Kryshev I.I., Ryazantsev E.P. 2017. Ekologicheskiy risk radiatsionnykh avariyy na Chernobyl'skoy AES i AES «Fukusima» (Yaponiya) [Environmental risk of radiation accidents at the Chernobyl NPP and Fukushima NPP (Japan)]. *Atomnaya energiya – Atomic Energy*, vol. 122, no. 1, pp. 46-55.

Marchenko T.A., Radin A.I., Razdaivodin A.N. 2020. Retrospektivnoye i sovremennoye sostoyaniye lesnykh territoriy prigranichnykh rayonov Bryanskoy oblasti, podvergnutyya radioaktivnomu zagryazneniyu [Retrospective and current state of forest territories of the border areas of the Bryansk region exposed to radioactive contamination]. *Radiatsionnaya Gygiena – Radiation Hygiene*, vol. 13, no. 2, pp. 6-18.

Nikipelov G.N., Romanov G.N., Buldakov L.A., Babaev N.S., Kholina Yu.B., Mikerin E.I. 1989. Radiatsionnaya avariya na YUzhnom Urale v 1957 g. [Radiation accident in the South Urals in 1957]. *Atomnaya energiya – Atomic Energy*, vol. 67, no. 2, pp. 74-80.

OASKRO, 2020. Radiatsionnaya obstanovka na predpriyatiyakh Rosatoma [The radiation situation at the enterprises of Rosatom (OASKRO)]. Elektronnyy resurs. URL: <https://www.russianatom.ru/> (data obrashcheniya 08 sentyabrya 2020).

Onishchenko G.G., Romanovich I.K., Balonov M.I. 2011. Avariya na AES «Fukusima-1»: pervyye itogi avariynogo reagirovaniya. Soobshcheniye 1: obshchiye svedeniya ob avarii i radiatsionnoy obstanovke [Fukushima-1 NPP accident: first results of emergency response. Message 1: general information about the accident and the radiation situation]. *Radiatsionnaya gigiyena – Radiation hygiene*, vol. 4, no. 2, pp. 5-12.

Panov A.V., Alexhakhin R.M., Prudnikov P.V., Novikov A.A., Muzalevskaya A.A. 2009. Vliyaniye zashchitnykh meropriyatiy na nakopleniye ¹³⁷Cs sel'skokhozyaystvennymi rasteniyami iz pochvy posle avarii na Chernobyl'skoy AES [Influence of rehabilitation measures on ¹³⁷Cs uptake by crops from soils contaminated during the Chernobyl NPP accident]. *Pochvovedeniye – Eurasian soil science*, no. 4, pp. 484-497.

Panov A.V., Sanzharova N.I., Kuznetsov V.K., Spiridonov S.I., Kurbakov D.N. 2019. Analiz podkhodov k radiatsionno-ekologicheskomu monitoringu v rayonakh razmeshcheniya yadernoy i radiatsionno-opasnykh ob'yektov. Obzor [Analysis of approaches to organization of radioecological monitoring on areas of nuclear and radiation-hazardous facilities location. Review]. *Radiatsiya i Risk – Radiation and Risk*, vol. 28, no. 3, pp. 75-95.

Romanov G.N. 1997. Radiatsionnaya avariya na PO "Mayak": praktika kontrmer, ikh effektivnost' i izvlechenye uroki [Radiation accident at Mayak PA: practice of countermeasures, their effectiveness and lessons learned]. *Voprosy radiatsionnoi bezopasnosti – Journal of Radiation Safety Issues*, no. 3, pp. 3-17.

Sanzharova N.I., Panov A.V., Kuznetsov V.K., Isamov N.N., Karpenko E.I., Gordienko E.V., Mikailova R.A. 2019. Kompleksnyy radiatsionno-ekologicheskiy monitoring v rayone raspolozheniya radiatsionno-opasnykh ob"yektov kak sostavnaya chast' Edinoi sistemy gosudarstvennogo ekologicheskogo monitoringa [Complex radioecological monitoring in the vicinity of radiation hazardous facilities as an integral part of the unified system of state environmental monitoring]. *Izvestiya vuzov. Yadernaya Energetika – News of higher educational institutions. Nuclear power*, no. 1, pp. 131-142.

Sanzharova N.I., Ratnikov A.N., Fesenko S.V., Panov A.V., Shubina O.A. 2020. Avariya na CHernobyl'skoy AES i problemy reabilitatsii sel'skokhozyaystvennykh territoriy [The accident at the Chernobyl nuclear power plant and the problems of rehabilitation of agricultural areas]. *Istoriya nauki i tekhniki – History of science and technology*, no. 7, pp. 73-89.

CHernobyl': Radioaktivnoye zagryazneniye prirodnnykh sred [Chernobyl: Radioactive contamination of natural environments]. 1990. Leningrad, 296 p.

Ekologicheskiye i meditsinskiye posledstviya radiatsionnoy avarii 1957 goda na PO «Mayak» [Environmental and Medical Consequences of the 1957 Radiation Accident at PA Mayak]. 2001. Moscow, 294 p.

Ekologicheskiye posledstviya radioaktivnogo zagryazneniya na YUzhnom Urale [Environmental consequences of radioactive contamination in the Southern Urals]. 1993. Moscow, 336 p.

Alexakhin R.M. 1993. Countermeasures in agricultural production as an effective means of mitigating the radiological consequences of the Chernobyl accident. – *Science of the Total Environment*, vol. 137, pp. 9-20.

Environmental Consequences of the Chernobyl Accident and Their Remediation: Twenty Years of Experience. 2006. Rep. of the Chernobyl Forum Expert Group Environment. – IAEA, Vienna, 166 p.

International Advisory Committee, The International Chernobyl Project. 1991. Tech. Rep. – IAEA, Vienna, 640 p.

Ministry of the Environment, Act on Special Measures Concerning the Handling of Environmental Pollution by Radioactive Materials Discharged by the Nuclear Power Station Accident Associated with the Tohoku District - Off the Pacific Ocean Earthquake That Occurred on March 11, 2011, Act No. 110. 2011, Japan, 13 p.

National Diet of Japan Fukushima Nuclear Accident Independent Investigation Commission, The Official Report of The Fukushima Nuclear Accident Independent Investigation Commission 2012. – National Diet of Japan, Tokyo, 88 p.

Sources, Effects and Risks of Ionizing Radiation (Report to the General Assembly), UNSCEAR 2013 Report, Vol. I, Scientific Annex A: Levels and Effects of Radiation Exposure Due to the Nuclear Accident after the 2011 Great East-Japan Earthquake and Tsunami, Scientific Committee on the Effects of Atomic Radiation. 2014. – UNSCEAR, UN, New York, 311 p.

The Fukushima Daiichi accident. Technical volume 3. Emergency Preparedness and Response. 2015a. – IAEA, Vienna, 196 p.

The Fukushima Daiichi accident. Technical volume 4. Radiological consequences. 2015b. – IAEA, Vienna, 250 p.

The Fukushima Daiichi accident. Technical volume 5. Post-accident Recovery. 2015c. – IAEA, Vienna, 204 p.