

ИЗУЧЕНИЕ ПОСЛЕДСТВИЙ АВАРИИ НА ЧЕРНОБЫЛЬСКОЙ АЭС

УДК 574:539.1.04

© 1993 г. Р.М. Алексахин

РАДИОЭКОЛОГИЧЕСКИЕ УРОКИ ЧЕРНОБЫЛЯ

Описаны основные результаты радиоэкологических исследований на территории, загрязненной в результате аварии на Чернобыльской АЭС. Излагаются выводы, освещающие ведущие закономерности миграции радионуклидов в различных природных средах и действия ионизирующих излучений на естественные и искусственные экосистемы. Определена эффективность основных защитных мероприятий экологического характера по ликвидации последствий аварии. Оценен вклад радиоэкологических исследований в ликвидацию последствий аварии на ЧАЭС.

Авария, Чернобыльская АЭС, радиоэкология, радионуклиды, миграция, ионизирующие излучения, экосистемы.

Авария на Чернобыльской АЭС является самой тяжелой, беспрецедентной по масштабам аварией как в ядерной энергетике, так и в атомной промышленности. Ликвидация ее последствий потребовала и продолжает требовать максимальной консолидации усилий представителей различных «ядерных» наук, в том числе и радиоэкологии. В настоящее время, спустя около 7 лет после аварии на ЧАЭС, обоснованно встает вопрос, какие основные выводы можно сделать из радиоэкологического опыта Чернобыля.

К моменту аварии на ЧАЭС радиоэкологическая наука имела более чем 50-летнюю историю (если начать ее отчет с исследований В.И. Вернадского по рассеянию естественных радионуклидов в различных природных средах и наблюдений Дж. Стоклазы и Дж. Пенкавы о действии повышенного природного радиационного фона на сообщества растений в районе выхода радиоактивных руд на земную поверхность в области урановых месторождений). В арсенале радиоэкологии была накоплена обширная научная информация о поведении основных в радиологическом отношении нуклидов в различных трофических цепочках в окружающей среде после испытаний ядерного оружия, был проанализирован и обобщен опыт крупнейшей радиационной аварии на Южном Урале в 1957 г. [1—3] и ядерной аварии в Уиндсдейле в 1957 г. [4]. В различных странах мира были проведены обширные комплексные радиоэкологические эксперименты по исследованию круговорота широкого набора радионуклидов при их искусственном внесении в лабораторных и полевых условиях. Мировая сводка данных о транспорте практически всех радионуклидов в различных природных средах (атмосфере, гидросфере, сухопутных биогеоценозах), в частности, дана в 6-томном издании монографического характера о поведении радионуклидов в биосфере [5]. Однако до аварии на Чернобыльской АЭС абсолютно доминировала концепция крайне редкой возможности реализации таких тяжелых аварийных ситуаций в ядерной энергетике (факти-

Рейтинг радиоэкологических эффектов на территории, подвергшейся воздействию аварии на Чернобыльской АЭС

Эффекты	Доза облучения, Зв/год	Плотность загрязнения ^{137}Cs , Ки/км 2 (МБк/м 2)
Поражение экосистем		
хвойные леса	10	>300 (>11)
лиственные леса	30	Не обнаружено (за исключением очень небольших участков)
травянистые естественные биогеоценозы	70	Не обнаружено
сельскохозяйственные посевы	50	"
Признаки радиационного поражения млекопитающих (в частности, сельскохозяйственных животных) от накопления ^{131}I в щитовидной железе	50 (на щитовидную же- лезу)	200 (7,4)
Ранние генетические эффекты	0,1	50 (1,9)
Превышение временно допустимого уровня (ВДУ) содержания ^{137}Cs		
молоко (370 Бк/л)		15 (0,6)
мясо (1900 Бк/кг)		80 (3,0)
зерно (370 Бк/кг)		>100 (>3,7)

чески такого рода аварии считались нереальными), что практически исключал хотя бы гипотетически превентивный анализ такого рода событий. Следовательно если не учитывать недостаточно освещенный в открытой литературе по известны теперь соображениям опыт аварии 1957 г. на Южном Урале, в принципе авария на ЧАЭС дала уникальный материал радиоэкологического характера.

Ниже излагаются основные выводы, которые могут быть сделаны в результате проведения обширных комплексных радиоэкологических исследований в регионе Чернобыльской аварии. Не исключено, что некоторые из этих выводов отражают субъективную точку зрения автора и могут быть предметом дискуссии.

Вывод 1. Подтверждена основная парадигма радиоэкологии — территории на которой проявляются признаки прямого радиационного поражения живых организмов, находящихся в загрязненной среде обитания, по размерам существенно меньше ареала, где концентрация радионуклидов в объектах природной среды и прежде всего в сельскохозяйственной продукции, поступающей в рацион населения, превышает предельно допустимые уровни и, следовательно, где фактически невозможно бесконтрольное проживание населения [6—11]. При этом в качестве предельно допустимых уровней содержания радионуклидов в объектах природной среды и пищевых продуктах приняты международные нормативы [12, 13], а в ряде районов загрязненной после аварии на ЧАЭС зоны — еще более жесткие временные допустимые уровни содержания ^{137}Cs в сельскохозяйственной продукции [14]. Так, непосредственное лучевое поражение хвойных (сосновых) лесов — одной из наиболее радиочувствительных экосистем биосфера в целом — из следов аварии на ЧАЭС отмечено при плотности загрязнения реперным для этой аварии нуклидом ^{137}Cs от 300 до 800 Ки/км 2 и более (11,1 — 29,6 МБк/м 2) в зависимости от радионуклидного состава выпадения. Превышение же временно допустимых уровней (международные стандарты) содержания ^{137}Cs в молоке (370 Бк/л) — основном критическом дозообразующем продукте пищевого рациона населения может быть достигнуто при плотности загрязнения ^{137}Cs 0,5—2,0 Ки/км 2 (18,5 — 74 кБк/м 2). Такая радиологическая обстановка характерна, например, для района распространения легких подзолистых и торфяных почв Ровенской области Украины.

Рейтинг радиоэкологических проблем в зависимости от плотности радиоактивного загрязнения и мощностей доз облучения дан в таблице.

Вывод 2. Различные естественные и искусственные биогеоценозы характеризуются большой вариабельностью по радиорезистентности, и в целом даже в условиях очень тяжелых радиационных аварий, какой явилась авария на ЧАЭС, за исключением хвойных (сосновых) лесов, полного летального поражения на экосистемном уровне не отмечено. В самой ближней по отношению к реактору зоне на очень большой площади практически полному разрушению подверглись небольшие участки лиственных (березовых) лесов. Наиболее уязвимым естественным биогеоценозом к действию ионизирующих излучений, как и в случае аварии на Южном Урале в 1957 г., были сосновые леса (площадь сосновых лесов с летальным и сублетальным повреждением в зоне ЧАЭС составила соответственно 600 и 3800 га [15, 16]). В остальных типах биогеоценозов лучевое поражение коснулось лишь отдельных представителей, не являющихся доминантными в экосистемах (например, млекопитающих в ближней зоне).

Особо следует отметить радиационное поражение щитовидной железы млекопитающих из-за избирательного накопления радиоиода (прежде всего ^{131}I). Кумулятивные дозы облучения щитовидной железы у млекопитающих были существенно выше, чем других органов. Так, у коров при выпасе на загрязненных пастбищах в течение 240 сут после аварии на ЧАЭС соотношение поглощенных доз на щитовидную железу, слизистую желудочно-кишечного тракта и все тело составляло примерно 230:1,2:1 [17]. Эти эффекты могли иметь определенное хозяйственное значение, если их рассматривать для сельскохозяйственных животных, находившихся в зоне воздействия аварийного выброса [18].

Следует подчеркнуть, что поглощенные дозы облучения объектами живой природы при радиационных авариях с выбросом радионуклидов выше (иногда весьма существенно), чем дозовые нагрузки на человека. Так, при аварии на ЧАЭС в хвойных лесах это превышение за 1-й год после аварии составляло 47—116 раз, в лиственных биогеоценозах — 40—100 раз, в луговых экосистемах — 45—95 раз, у грызунов в наземных зооценозах — 30 раз. Соответствующие величины при аварии на Южном Урале равнялись 7—27, 14—57, 17—77 и 1,4—28 раз. Лишь на Восточно-Уральском радиоактивном следе дозы облучения у человека и гидробионтов были сравнительно близки (отношение равно 0,02—2,6) [19].

Отмечая в целом достаточно высокую радиорезистентность природных и культурных экосистем к действию ионизирующих излучений в условиях даже таких тяжелых радиационных аварий с выбросом радиоактивных веществ в окружающую среду, как это было в Чернобыле, необходимо констатировать, что признаки радиационного повреждения у живых организмов в результате Чернобыльской аварии на более «низких» (чем экосистемный) уровнях организации биологических явлений были обнаружены на очень больших территориях [20]. К такого рода эффектам прежде всего следует отнести цитогенетические нарушения (хромосомные aberrации) у различных представителей живых организмов (растений, животных). Так, статистически достоверное увеличение числа хромосомных нарушений вследствие чернобыльского загрязнения в лимфоцитах периферической крови молодняка полудомашних оленей было отмечено в 1986 г. даже на таком большом удалении от Чернобыльской АЭС, как территория Норвегии [21]. Аналогичные аномалии были обнаружены на значительном расстоянии от места аварии и для представителей других видов живых организмов [20]. Однако по мере продвижения проявления действия ионизирующих излучений вверх по иерархической лестнице организации биологических явлений — от молекулярного и клеточного уровней до популяционного и биогеоценотического — срабатывают мощные механизмы восстановления от радиационных повреждений, и на организменной и экосистемной ступеньках радиационные эффекты наблюдаются лишь в относительно ближней зоне аварии при сравнительно высоких мощностях дозы и больших кумулятивных дозах облучения [22—25].

По результатам радиоэкологических исследований на радиоактивных следах Челябинской и Чернобыльской аварий, а также по итогам крупномасштабных

экспериментов с облучением природных биогеоценозов от мощных точечных источников, включая опыты, проведенные в бывшем СССР с самым крупным таким источником ^{137}Cs (32 кКи, 1180 ТБк) [26], следует прийти к выводу, что при ежегодном хроническом облучении с кумулятивной дозой меньше 5 Гр каких-либо отклонений в функционировании даже самых радиочувствительных экосистем не происходит. Ежегодную кумулятивную дозу 5 Гр можно считать нижней границей возможного радиационного поражения на экосистемном уровне.

Вывод 3. При радиоактивном загрязнении обширных территорий, как это было при аварии на ЧАЭС, когда воздействию подвергаются различные природные ландшафты и разные природные и культурные биогеоценозы и когда миграция радионуклидов охватывает большое разнообразие пищевых и трофических цепочек, формируются «горячие» радиоэкологические точки. Под такими объектами понимаются как природные и культурные биогеоценозы в целом, так и отдельные их компоненты или конкретные цепочки переноса, которые характеризуются повышенной аккумуляцией радионуклидов или усиленными темпами миграции радиоактивных веществ по этим цепочкам. Наличие экологически «горячих» точек особенно важно в радиационно-гигиеническом отношении, так как с ними могут быть связаны ведущие источники облучения населения. В этих точках могут формироваться максимальные дозовые нагрузки на природные объекты.

К числу таких «горячих» экологических точек можно отнести уже упоминавшиеся хвойные леса. В лесных биогеоценозах при радиоактивном загрязнении формируется очень гетерогенное дозное поле вследствие повышенной аккумуляции радионуклидов в отдельных экологических нишах. В частности, к экологически «горячим» точкам в лесу относится слой подстилки и самого верхнего дернового слоя почвы (0—2 см). Из-за сосредоточения радиоактивных веществ в лесной подстилке и верхнем слое почвы повышенному облучению подвергается мезофауна; отмечены признаки ее радиационного поражения [27].

Особое место среди экологически «горячих» точек на территории аварии на ЧАЭС занимают луговые биогеоценозы (аналогичная ситуация была и при аварии на Южном Урале) [28, 29]. Их критическое положение объясняется, с одной стороны, спецификой миграции на лугах долгоживущих радионуклидов (^{90}Sr и ^{137}Cs), а с другой — луга и пастбища являются основной кормовой базой сельскохозяйственных животных. Нужно учесть, далее, что именно молоко и (в меньшей степени) мясо играют роль ведущих источников внутреннего (а следовательно, как правило, и суммарного) облучения населения, проживающего на загрязненной территории. Наличие мощного слоя луговой дернины (подстилки) обеспечивает поддержание длительно действующего депо ^{90}Sr и ^{137}Cs , доступных для усвоения растениями (в дернине ^{90}Sr , ^{137}Cs и другие радионуклиды находятся в более мобильном состоянии, так как значение фиксации радионуклидов твердой фазой в дерновом слое невелико по сравнению с сорбцией радиоактивных веществ собственно в почве).

К числу «горячих» экологических цепочек следует также отнести миграционную систему ирригационная вода — сельскохозяйственные растения, так как известно, что при орошении (особенно по способу дождевания) интенсивность включения радионуклидов в сферу биологического круговорота вода — растения — почва — сельскохозяйственная продукция повышена [30]. Это послужило причиной серьезного анализа возможностей использования вод Днепровского каскада в 1986–1988 гг. для орошения сельскохозяйственных угодий на значительной площади Украины. К счастью, концентрации ^{137}Cs и ^{90}Sr в водах Днепра в первые годы после аварии были относительно низкими и не создали серьезной радиологической проблемы для орошения [31, 32]. Однако в низовьях Днепра, в области рисосеяния на Украине, из-за высоких оросительных норм, необходимых для возделывания этой сельскохозяйственной культуры,

отмечено повышенное накопление радионуклидов как в рисовых чеках, так и в зерне риса. Эти культурные экосистемы также могут рассматриваться как критические.

Перечень радиоэкологически «горячих» точек и объектов может быть продолжен. Так, к их числу в водных экосистемах (например, в пруду-охладителе ЧАЭС) относятся донные отложения и связанная с ними биота [33]; организмы — концентраторы радионуклидов (например, съедобные грибы в лесах, характеризующиеся очень высокой селективной аккумуляцией ^{137}Cs ; накопление этого радионуклида грибами приблизительно в 50 раз выше, чем естественными и сельскохозяйственными растениями [34]); лесные пастбища, выпас животных на которых приводит к 2—3-кратному увеличению содержания ^{137}Cs (и ^{90}Sr) в молоке по сравнению с таковым при выпасе на открытых лугах и пастбищах; традиционные арктические и приарктические цепочки лишайники — олень — человек для северных районов Европы, где были зарегистрированы чернобыльские выпадения ^{137}Cs [21], и т.д.

Вывод 4. Миграция радионуклидов, выброшенных в окружающую среду при аварии на ЧАЭС, по пищевым и трофическим цепочкам тесно сопряжена с биогеохимическими условиями в зоне аварии. Как известно, основной регион Чернобыльской аварии — зона полесий, характеризующаяся распространением легких по гранулометрическому составу (песчаных и супесчаных) почв, обедненных гумусом и элементами минерального питания с характерными низкой емкостью обмена, малым содержанием вторичных глинистых минералов и повышенной гидроморфностью. Это — зона дерново-подзолистых и торфянистых почв, которым свойствен повышенный переход ^{137}Cs из почвы в растения (коэффициенты накопления ^{137}Cs растениями здесь в 4—5 раз выше, чем на почвах более тяжелого механического состава — суглинистых и глинистых; по накоплению ^{137}Cs растения в этой зоне близки к аккумуляции ^{90}Sr , хотя на более тяжелых почвах ^{90}Sr накапливается растениями в 5—10 раз интенсивнее, чем ^{137}Cs). Указанная особенность региона полесий, отмеченная еще при изучении миграции ^{90}Sr и ^{137}Cs , связанных с глобальными выпадениями после испытаний ядерного оружия [35, 36], имеет принципиальное значение для формирования радиологической обстановки на этой территории, определяя возможность достаточно высокого загрязнения сельскохозяйственной продукции ^{137}Cs при относительно низких плотностях загрязнения территории этим радионуклидом. В качестве прикладного заключения из этих наблюдений можно высказать точку зрения, что при выборе мест размещения АЭС и других предприятий ядерной энергетики нужно предварительно тщательно оценивать биогеохимическую обстановку в регионе.

Вывод 5. Интенсивность включения поступивших в природную среду после аварии радиоактивных веществ в биологические цепочки миграции зависит от формы радионуклидов. Выпадения радионуклидов в результате аварии на ЧАЭС были достаточно разнообразными как по форме, так и по радионуклидному составу. В ближней зоне доминировали выпадения в форме неразрушенных частиц твэлов, в которых были инкорпорированы радионуклиды (в матрице из диоксида урана), в дальней зоне преобладали выпадения конденсационного типа. Основной массив радиоэкологической информации о переносе в окружающей среде долгоживущих радионуклидов (^{90}Sr и ^{137}Cs) связан с изучением глобальных выпадений (т.е. исследованы особенности транспорта радионуклидов в подвижной, достаточно растворимой форме). Поведение же ^{90}Sr и ^{137}Cs в составе частиц (типа матрицы из диоксида урана) оценено очень слабо [37]. Было отмечено, что относительная биологическая доступность ^{137}Cs (отношение накопления радионуклида живыми организмами из частиц по сравнению с аккумуляцией из водно-растворимой формы) в ближней зоне аварии была несколько ниже, чем в дальней зоне [38]. В целом же за пределами 30-километровой зоны аварии поведение ^{137}Cs в системе выпадения — почвы — растения — жи-

вотные даже в первые 2 года после аварии было по количественным параметрам переноса аналогично поведению ^{137}Cs глобального происхождения. Это давало основание для полнообъемного использования обширной информации о поведении ^{137}Cs глобальных выпадений для описания транспорта в окружающей среде чернобыльского ^{137}Cs .

Вывод 6. Поступившие при аварии в окружающую среду радионуклиды изначально являются новыми ингредиентами, в связи с чем их мобильность и доступность для включения в биологические цепочки с течением времени могут изменяться. Эти изменения могут быть направлены как в сторону уменьшения со временем доступности радионуклидов для усвоения живыми организмами, так и увеличения этой подвижности.

Для подавляющей территории чернобыльского загрязнения с течением времени отмечается снижение биологической мобильности наиболее важного, «реперного» для аварии на ЧАЭС радионуклида — ^{137}Cs . Особенно характерно «старение» для ^{137}Cs в основном депо этого радионуклида в регионе аварии — в почве. Размеры уменьшения интенсивности включения ^{137}Cs в растения из почвы зависят от ее типа, биологических особенностей растений, формы выпадений радионуклида и других факторов. По сравнению с первым послеварийным годом (1986-м) на 3—4-й годы после аварии снижение корневого (почвенного) усвоения ^{137}Cs растениями (как на естественных угодьях, так и на пахотных почвах без мелиоративных мероприятий) может достигать 2—4 раз и более [29, 39—43]. Со временем скорость уменьшения доступности для растений находящегося после аварии в почвах ^{137}Cs снижается. Псогают, что процесс «старения» ^{137}Cs в почвах на территории аварийного загрязнения в основном завершаются по истечении примерно 5-летнего периода [44]. Убедительным показателем завершения «старения» ^{137}Cs чернобыльского происхождения в почвах является достижение равновесного соотношения в формах нахождения почвах нативного стабильного ^{133}Cs и его радиоактивного аналога — чернобыльского ^{137}Cs [34]. Это, однако, не исключает длительно действующих процессов изменения форм ^{137}Cs и его вертикальной миграции в почвенном профиле, что несомненно будет сказываться на его биологической подвижности. В ближней зоне аварии (в радиусе 10 км от ЧАЭС), где превалирует топливная форма выпадений, с течением времени в первый период отмечено некоторое увеличение подвижности ^{90}Sr при корневом усвоении растениями, что связано с выветриванием частиц диоксида урана и переходом ^{90}Sr в более подвижное состояние [45].

Вывод 7. Пищевые продукты, производимые из сельскохозяйственной продукции, получаемой на загрязненных угодьях, являются важным источником дополнительного (аварийного) облучения населения. Вклад внутреннего облучения в суммарную дозовую нагрузку на человека, проживающего в регионе, подвергшемся воздействию аварии (как на территории бывшего СССР, так и в странах Западной Европы), зависит от большого числа факторов и может быть весьма существенным. Так, для ряда районов Беларуси, России и Украины он достигает 30—50% и более [46—49]. Высокие значения этого показателя (особенно в 1-й год после аварии) зарегистрированы для структуры дозовых нагрузок в странах Западной Европы [50]. Например, для 1-го года соотношение доз внутреннего и внешнего облучений в разных регионах северного полушария колебалось примерно от 4 до 7, для последующих лет оно составило около 0,6, а в целом при расчете на бесконечное время эта величина равнялась приблизительно единице, т.е. вклад внутреннего и внешнего облучений в суммарную дозу был одинаковым [51]. Таким образом, система защитных мероприятий проводимых в агропромышленном комплексе в зоне аварии, становится важна в программе мер по ликвидации последствий аварии на ЧАЭС в целом. Значимость этих контрмер в сельском хозяйстве становится особенно очевидна если учесть очень высокие экономические затраты, необходимые для снижения

доз внешнего облучения (дезактивация территории с удалением наиболее загрязненного верхнего слоя почв или грунтов). Следовательно, при тяжелых радиационных авариях с выбросом больших количеств радиоактивных веществ в окружающую среду, если в смеси выделенных радионуклидов присутствуют долгоживущие компоненты (^{90}Sr , ^{137}Cs , ^{239}Pu и др.), системе защитных мер в атмосфере должно уделяться приоритетное внимание [6, 52—55].

В регионе аварии на Чернобыльской АЭС, расположенному в России, вследствие проведения комплекса защитных мероприятий в сельском хозяйстве поступление ^{137}Cs в растения на пахотных землях было снижено в 1986—1991 гг. в среднем в 2,2 раза, а на лугах и пастбищах переход ^{137}Cs в кормовые растения был уменьшен в 2,8 раза [56]. Введение системы защитных мероприятий по ограничению поступления ^{137}Cs с пищевыми продуктами обеспечивало 2—3-кратное уменьшение дозы внутреннего облучения [57]. При выражении эффективности контрмер в агропромышленном комплексе всего Чернобыльского региона (Беларусь, Россия и Украина) в снижении коллективной дозы суммарного облучения населения эта величина оценивается, по нашим расчетам, приблизительно 30%.

Вывод 8. Как уже отмечалось выше, реперным дозообразующим в долговременной перспективе радионуклидом на подавляющей части региона, подверженного воздействию аварии на ЧАЭС, является ^{137}Cs (хотя значение ^{90}Sr , особенно на участках, где соотношение $^{90}\text{Sr}/^{137}\text{Cs}$ относительно высоко, а также ^{239}Pu следует также учитывать). На долю ^{137}Cs приходится около 70% коллективной эквивалентной эффективной дозы, которая рассчитана для населения всего земного шара как следствие аварии на ЧАЭС [51].

Ввиду доминирующего положения ^{137}Cs в дозообразовании основное внимание в радиоэкологических исследованиях миграции радиоактивных веществ чернобыльского происхождения уделяется именно этому радионуклиду. Нужно отметить, что в «дочернобыльский» период истории радиоэкологии существенно большее число публикаций освещало поведение ^{90}Sr , хотя ^{137}Cs тоже был предметом повышенного интереса у радиоэкологов. Исследования аварии в Чернобыле заметно продвинули радиоэкологию ^{137}Cs . Были изучены более детально механизмы специфической сорбции этого радионуклида в почвах с установлением особой роли некоторых групп глинистых минералов [58], количественно охарактеризованы темпы «старения» этого радионуклида, разработан комплекс защитных мер по ограничению перехода ^{137}Cs в биологические цепочки, собран значительный материал по коэффициентам переноса ^{137}Cs в различных трофических звеньях миграции.

Для ^{137}Cs были очень удачно найдены (здесь преимущественные заслуги принадлежат норвежским ученым) химические соединения, характеризующиеся исключительно высокими селективными сорбционными свойствами по отношению к этому радионуклиду, — ферроцианиды (в частности, прусская голубая соль). В «стронциевый» период истории радиоэкологии такого селективного вещества (по отношению к ^{90}Sr) обнаружено не было. Применение ферроцианидов в практике сельского хозяйства ряда скандинавских стран позволило существенно уменьшить содержание ^{137}Cs в молоке и мясе [59]. Наконец, были построены математические модели круговорота ^{137}Cs в типичных естественных и культурных биогеоценозах и их отдельных компонентах (в первую очередь в почвах). Таким образом, радиоэкологические исследования ^{137}Cs чернобыльского происхождения позволили достаточно полно описать поведение этого важнейшего искусственного радионуклида в окружающей среде.

Вывод 9. При крупных радиационных авариях (как это было на Южном Урале и в Чернобыле) предмет особого внимания составляет территория, непосредственно прилегающая к месту выброса (к 4-му блоку ЧАЭС), — так называемая зона отчуждения вокруг Чернобыльской АЭС (условно часто именуемая 30-километровой зоной, хотя ее конфигурация не является, естественно, круговой,

а определяется на местности соответствующими плотностью загрязнения и мощностью дозы). Создание концепции обращения с этой зоной представляет важную задачу (в том числе радиоэкологического характера). Принципиальное отношение к этой зоне, как показывает 7-летний опыт ликвидации последствий Чернобыльской аварии, колеблется в очень широком диапазоне, включая полярные позиции — от полного хозяйственного освоения зоны отчуждения (возвращения всей территории в хозяйственное пользование) до абсолютного отказа от вмешательства человека в процессы, происходящие в этой зоне. В радиоэкологическом аспекте действительно можно предложить достаточно радиационно безопасные технологии, применение которых в зоне отчуждения обеспечивает получение продукции, отвечающей обычным радиологическим стандартам (стандартам «мирного» времени, т.е. стандартам, которые используются в обычных, неаварийных ситуациях при штатном режиме функционирования ядерных установок и предприятий). К числу таких технологий в агропромышленном производстве могли бы быть отнесены отгонное скотоводство, возделывание технических культур и растений непищевого назначения, семеноводство и т.п. С этой точки зрения перспективным может оказаться пушное звероводство. Предложены гидропонные культуры в зоне отчуждения, эксплуатация которых практически исключает использование загрязненных почв. Применительно к зоне отчуждения ЧАЭС оправданность таких предложений подкрепляется большой гетерогенностью загрязнения этой зоны с наличием достаточно больших участков, характеризующихся относительно низкой плотностью загрязнения.

Однако помимо чисто радиоэкологического подхода при построении концепции обращения с зоной отчуждения следует в первую очередь принять во внимание радиационно-гигиенические, социальные, этические, психологические и экономические аспекты этой исключительно сложной комплексной задачи. В этом плане нам представляются недостаточно оправданными некоторые «экзотические» варианты отдельных технологий, которые хотя и могут обеспечить получение продукции, отвечающей радиологическим стандартам, но одновременно потребуют значительных дозовых или экономических затрат. С этой точки зрения ориентация на скорейшее «освоение» зоны отчуждения не кажется целесообразной. Безусловно необходимым является такая форма деятельности человека в этой зоне, как всемерная «помощь» природе в ускорении течения естественных восстановительных процессов (в первую очередь это касается проведения лесовосстановительных и лесокультурных работ). Нужным мероприятием является также создание биогеохимических и инженерно-технологических барьера, препятствующих разносу радиоактивных веществ из зоны отчуждения на прилегающие менее загрязненные территории [60]. Первостепенное значение имеет организация комплекса научно-исследовательских работ в зоне отчуждения, части которой (наиболее загрязненной) должен быть придан статус государственного заповедника (как это сделано в зоне аварии на Южном Урале).

Вывод 10. Итоги радиоэкологических исследований на территории, подвергшейся воздействию аварии на ЧАЭС, легли в основу системы комплекса защитных мероприятий, охвативших агропромышленное производство, ведение лесного, рыбного и водного хозяйства. Эти итоги явились базисными при формировании концепций безопасного проживания населения на территории, подвергшейся радиоактивному загрязнению. В результате радиоэкологических исследований транспорта радионуклидов были решены многие инженерно-гидротехнические вопросы по предотвращению переноса радиоактивных веществ в гидрографической сети зоны аварии, включая проблемы загрязнения вод Днепра. Радиоэкологический опыт Чернобыля — это не только накопление, систематизация и анализ обширной информации по миграции радионуклидов в разных природных средах, но и решение важнейших прикладных проблем. Не всегда этот опыт был связан однозначно с положительными результатами (так, неоправданными оказались экстренная вырубка «рыжего леса» и его последующее

захоронение, не везде бесспорным, экономически и экологически целесообразным явилось сооружение гидротехнических фильтров и барьеров по пути миграции радионуклидов, недостаточно эффективным было в некоторых случаях применение цеолитов для сорбции и фиксации радионуклидов) [60]. Однако в целом нельзя недооценивать радиоэкологических уроков Чернобыля, позволивших реализовать на громадных территориях систему комплексных мероприятий по ликвидации последствий крупнейшей радиационной аварии.

Беспрецедентная по своим масштабам Чернобыльская авария дала мощный импульс развитию радиоэкологии как в странах — членах СНГ (особенно на Украине, в Беларуси и России), так и в странах Западной Европы. Радиоэкологические исследования на территории СНГ во многом приняли международный характер. Выполняются крупные программы научно-исследовательских работ по радиоэкологии, в которых принимают активное участие такие высокоявторитетные организации, как Всемирная организация здравоохранения, МАГАТЭ, ЮНЕП, Международный союз радиоэкологов, Комиссия Европейских Сообществ, ФАО и пр. Под эгидой МАГАТЭ выполнена обширная программа «Международный Чернобыльский проект» [14], охватывающая важные разделы радиоэкологии, радиационной гигиены и медицины. Такое исключительное внимание к проблемам ликвидации последствий аварии на Чернобыльской АЭС (в том числе радиоэкологических) связано прежде всего с решением кардинального вопроса о возможностях экологически безопасного развития ядерной энергетики как базовой отрасли энергетики при удовлетворении растущих энергетических потребностей человечества.

Как уже отмечено ранее, указанными выше десятью радиоэкологическими уроками не исчерпываются основные результаты обширных радиоэкологических исследований в зоне влияния Чернобыля, под которой в широком смысле следует понимать не только загрязненные регионы Беларуси, России и Украины, но и территорию других стран — членов СНГ, а также стран Европы, попавших под воздействие чернобыльских выпадений. Самостоятельный рассмотрения достойны синергическое действие ионизирующих излучений и других экологических факторов, вопросы влияния малых доз облучения живой природы на очень больших территориях, радиационно-генетические проблемы Чернобыля, отдаленные последствия облучения различных видов живых организмов, обитающих на указанных территориях. Несомненно, что радиоэкологические исследования обогащают радиобиологическую науку в целом, в частности большой интерес представляют исследования с экспонированием лабораторных животных непосредственно в природной среде, подвергшейся радиоактивному загрязнению [61, 62].

В заключение следует сказать, что радиоэкологические уроки Чернобыля — это не только всеобъемлющая оценка, всесторонний анализ и широкомасштабная ликвидация последствий крупнейшей радиационной аварии в истории мировой ядерной энергетики (а, может быть, и развития промышленности в целом), но и грозное предупреждение о масштабах возможного негативного влияния на находящихся в тесном единстве человека и окружающую его среду, если не будут предприняты своевременные меры по предотвращению подобных катастроф.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Итоги изучения и опыт ликвидации последствий аварийного загрязнения территории продуктами деления урана / Под ред. А.И. Бурназяна. М.: Энергоатомиздат, 1990. 144 с.
2. Никителов Б.В., Романов Г.Н., Булдаков Л.А., Бабаев Н.С., Холина Ю.Б., Микерин Е.И. // Атом. энергия. 1989. Т. 67. Вып. 2. С. 74—80.
3. Криволуцкий Д.А., Тихомиров Ф.А., Федоров Е.А., Покаржевский А.Д., Таскаев А.И. Действие ионизирующей радиации на биогеоценоз. М.: Наука, 1988. 240 с.

4. Dunster J., Howells H., Temperton W.I. // Second United Nations International Conference on the Peaceful Uses of Atomic Energy. Geneva, 1958. V. 18. P. 296—308.
5. Radionuclide Distribution and Transport in Terrestrial and Aquatic Ecosystems / A.A. Balkema. Rotterdam, 1983. V. 1—6.
6. Сельскохозяйственная радиоэкология / Под ред. Р.М. Алексахина, Н.А. Корнеева. М.: Экология, 1992. 400 с.
7. Корнеев Н.А., Поваляев А.П., Алексахин Р.М., Пантелейев Л.И., Ратников А.Н., Круглов С.В., Санжарова Н.И., Исамов Н.Н., Сироткин А.Н. // Атом энергия. 1988. Т. 65. Вып. 2. С. 129—134.
8. Алексахин Р.М. // Проблемы радиогеохимии и космохимии. М.: Наука, 1992. С. 175—205.
9. Алексахин Р.М., Крылов И.И., Фесенко С.В., Санжарова Н.И. // Атом. энергия. 1990 Т. 68, Вып. 5. С. 320—328.
10. Медведев Ж.А. // Радиobiология. 1991. Т. 31. Вып. 6. С. 771—793.
11. Израэль Ю.А., Соколовский В.Г., Соколов В.Е., Ветров В.А., Дибобес И.К., Трусов А.Г., Рябов И.Н., Алексахин Р.М., Поваляев А.П., Булдаков Л.А., Борзилов В.А. // Атом. энергия. 1988. Т. 64. Вып. 1. С. 28—40.
12. World Health Organization. Derived Intervention Levels for Radionuclides in Food. Geneva: WHO, 1988. Р. 60.
13. Luykx F. // Environmental Contamination Following a Major Nuclear Accident: Proc. of a Symp. Vienna, 16—20 October 1989. Vienna: IAEA, 1990. V. 2. Р. 269—288.
14. Международный Чернобыльский проект. Оценка радиологических последствий и защитных мер: Доклад Международного консультативного комитета. М.: ИздАТ, 1991. 96 с.
15. Козубов Г.М., Таскаев А.И., Федотов И.С., Архипов Н.П., Давыдовичук В.С., Абатуров Ю.Д. Карта-схема радиационного поражения хвойных лесов в районе аварии на Чернобыльской АЭС. Сыктывкар: Изд. Ин-та биологии Коми науч. центра Урал. отд-ния АН СССР, 1991. 10 с. + карта.
16. Тихомиров Ф.А., Сидоров В.П. // Биологические и радиоэкологические аспекты последствий аварии на Чернобыльской атомной станции: Тез. докл. I Междунар. конф. 10—18 сентября 1990 г., Зеленый мыс. М.: Наука, 1990. С. 18.
17. Алексахин Р.М., Сарапульцев И.А., Спирина Е.В., Удалов Д.Б. // Докл. РАН. 1992. Т. 323. № 3. С. 576—579.
18. Кишин В.А., Бударков В.А. Ветеринарная противорадиационная защита. М.: Агропромиздат, 1990. 207 с.
19. Романов Г.Н., Спирина Д.А. // Докл. АН СССР. 1991. Т. 318. № 1. С. 248—251.
20. Биологические и радиоэкологические аспекты последствий аварии на Чернобыльской атомной станции: Тез. докл. I Междунар. конф. 10—18 сентября 1990 г., Зеленый мыс. М.: Наука, 1990. 304 с.
21. Røed K. // Radioaktivt nedfall fra Tsjernobyl-ulykken. Følger for norsk landbruk, naturmiljø og matsforsyning / Red. T.H. Garmo, T.B. Gunnerød. Norges Landbruksvitenskapelige Forskningsråd, 1992. Р. 103—111.
22. Сущеня Л.М., Пикулик М.М., Пленин А.Е. // Биологические и радиоэкологические аспекты последствий аварии на Чернобыльской атомной станции: Тез. докл. I Междунар. конф. 10—18 сентября 1990 г., Зеленый мыс. М.: Наука, 1990. С. 58.
23. Таскаев А.И., Шевченко В.А., Попова О.Н. и др. Эколо-генетические последствия аварии на Чернобыльской АЭС для флоры: Сер. препринтов «Научные доклады». Сыктывкар: Коми науч. центр УрО АН СССР, 1988.
24. Романов Г.Н., Спирина Д.А. // Биологические и радиоэкологические аспекты последствий аварии на Чернобыльской атомной станции: Тез. докл. I Междунар. конф. 10—18 сентября 1990 г., Зеленый мыс. М.: АН СССР, 1990. С. 55.
25. Радиоэкологические последствия Чернобыльской аварии // Под ред. И.И. Крышева. М.: Изд. ИАЭ им. И.В. Курчатова, 1991. 190 с.
26. Карабань Р.Т., Мишенков Н.Н., Пристер Б.С., Алексахин Р.М., Тихомиров Ф.А., Федоров Е.А., Романов Г.Н. // Проблемы лесной радиоэкологии: Тр. Ин-та приклад. геофизики. Вып. 39 / Под ред. Р.М. Алексахина, Р.Т. Карабаня. М.: Гидрометеоиздат, 1979. С. 27—52.
27. Криволуцкий Д.А., Покаржевский Д.А. // Биологические и радиоэкологические аспекты последствий аварии на Чернобыльской атомной станции: Тез. докл. I Междунар. конф. 10—18 сентября 1990 г., Зеленый мыс. М.: АН СССР, 1990. С. 78.

28. Корнеев Н.А., Сироткин А.Н., Корнеева Н.В. Снижение радиоактивности в растениях и продуктах животноводства. М.: Колос, 1977. 208 с.
29. Фирсакова С.К. Луговые биогеоценозы как критические радиоэкологические системы и принципы ведения луговодства в условиях радиоактивного загрязнения (на примере Белорусского Полесья после аварии на Чернобыльской АЭС): Дис. ... д-ра биол. наук. Обнинск: ВНИИСХР, 1992. 59 с.
30. Радиоэкология орошаемого земледелия / Под ред. Р.М. Алексахина. М.: Энергатомиздат, 1985. 224 с.
31. Чернобыль: радиоактивное загрязнение природных сред / Под ред. Ю.А. Израэля. Л.: Гидрометеоиздат, 1990. 296 с.
32. Vakulovskiy S.M., Voytsekhovich O.V., Katrich I.Yu., Medinets V.T., Nikitin A.I., Chumichev V.B. // Environmental Contamination Following a Major Nuclear Accident: Proc. a Symp. Vienna, 16—20 October 1989. Vienna: IAEA, 1990. V. 1. P. 231—246.
33. Рябов И.Н. // Биологические и радиоэкологические аспекты последствий аварии на Чернобыльской атомной станции: Тез. докл. I Междунар. конф. 10—18 сентября 1990 г., Зеленый мыс. М.: Наука. 1990. С. 121.
34. Haugen L.E., Uhlen G. // Radioaktivt nedfall fra Tsjernobyl-ulykken. Følger for norsk landbruk naturmiljø og matsforsyning / Red. T.H. Garmo, T.B. Gunnerød. Norges Landbruksvitenskapelige Forskningsråd, 1992. P. 43—64.
35. Марей А.Н., Бархударов Р.М., Новикова Н.Я. Глобальные выпадения ^{137}Cs и человек. М.: Атомиздат. 1974. 166 с.
36. Mouseev A.A., Ramzaev P.B. Цезий-137 в биосфере. М.: Атомиздат, 1975. 180 с.
37. Антропогенная радионуклидная аномалия и растения / Под ред. Д.М. Гродзинского. Киев: Лыбидь, 1991. 160 с.
38. Бондарь П.Ф., Иванов Ю.А., Озорнов А.Г. // Агрочимия. 1992. № 2. С. 102—110.
39. Фирсакова С.К., Гребеникова Н.В., Тимофеев С.Ф., Новик А.А., Алексахин Р.М. // Докл. АН СССР. 1991. Т. 320. № 6. С. 1498—1500.
40. Фирсакова С.К., Гребеникова Н.В., Тимофеев С.В., Новик А.А., Алексахин Р.М. // Докл. ВАСХНИЛ. 1992. № 3. С. 25—27.
41. Prister B., Loshchilov N., Perepelyatnikova L., Perepelyatnikov G., Bondar P. // The Science of the Total Environment. 1991. V. 112. P. 79—87.
42. Eriksson Å., Rosén K. // The Chernobyl Fallout in Sweden. Results from a Research Programme on Environmental Radiology / Ed. L. Moberg. The Swedish Radiation Protection Institute. Sundt Artprint. Stockholm, 1991. P. 291—304.
43. Karlén G., Johnson K.I. // The Chernobyl Fallout in Sweden. Results from a Research Programme on Environmental Radiology / Ed. L. Moberg. The Swedish Radiation Protection Institute. Sundt Artprint. Stockholm, 1991. P. 343—360.
44. Суркова Л.В., Погодин Р.И. // Агрочимия. 1991. № 4. С. 84—86.
45. Alexakhin R.M. // The Science of the Total Environment. 1993 (in press).
46. Ильин Л.А., Павловский О.А. // Атом. энергия. 1988. Т. 65. Вып. 2. С. 119—129.
47. Ильин Л.А. // Мед. радиол. 1991. № 12. с. 9—18.
48. Izraehl' Yu.A. // Environmental Contamination Following a Major Nuclear Accident: Proc. of a Symp. Vienna, 16—20 October 1989. Vienna: IAEA, 1990. V. 1. P. 3—22.
49. Балонов М.И., Травникова И.Г. // I Международная рабочая группа по тяжелым авариям и их последствиям. Сочи, 30 октября — 3 ноября 1989 г. М., 1990. С. 153—161.
50. Paretzke H.G., Jacob P., Müller H., Pröhl G. // Environmental Contamination Following a Major Nuclear Accident: Proc. of a Symp. Vienna, 16—20 October 1989. Vienna: IAEA, 1990. V. 2. P. 289—300.
51. Bennett R.G. // Environmental Contamination Following a Major Nuclear Accident: Proc. a Symp. Vienna, 16—20 October 1989. Vienna: IAEA, 1990. V. 2. P. 251—260.
52. Пристер Б.С., Лошилов Н.А., Немец О.Ф., Поярков В.А. Основы сельскохозяйственной радиологии. 2-е изд. Киев: Урожай, 1991. 472 с.
53. Анненков Б.Н., Юдинцева Е.В. Основы сельскохозяйственной радиологии. М.: Агропромиздат, 1991. 287 с.
54. Гудков И.Н. Основы общей и сельскохозяйственной радиобиологии. Киев. Изд-во УСХА, 1991. 328 с.
55. Rosén K. // The Chernobyl Fallout in Sweden. Results from a Research Programme on Environmental Radiology / Ed. L. Moberg. The Swedish Radiation Protection Institute. Sundt Artprint. Stockholm, 1991. P. 305—322.
56. Ратников А.Н., Алексахин Р.М., Жигарева Т.Л., Санжарова Н.И., Попова Г.И. // Агрочимия. 1992. № 9. С. 112—116.

57. Barkhudarov R.M., Gordeev K.I., Savkin M.N. // Environmental Contamination Following a Major Nuclear Accident: Proc of a Symp. Vienna, 16—20 October 1989. Vienna: IAEA, 1990. V. 2. P. 311—318.
58. Cremers A., Elsen A., De Preter P., Maes A. // Nature. 1988. V. 335. № 6187. P. 247—249.
59. Hove K., Hansen H.S., Strand P. // Environmental Contamination Following a Major Nuclear Accident: Proc. of a Symp. Vienna, 16—20 October 1989. Vienna: IAEA, 1990. V. 2. P. 181—189.
60. Slobotovich E.V. // Proc. of I.U.R. Soviet Branch Seminar on the Radioecology and Countermeasures. Kiev, 27 April—2 May 1991. International Union of Radioecologists, 1992. P. 1—4.
61. Серкиз Я.И., Пинчук Л.Б., Дружина Н.А., Липская А.И., Трушин В.В., Коваль Г.Н., Пухова Г.Г., Родионова К.К., Ракша-Слюсарева Г.А. // Биологические и радиоэкологические аспекты последствий аварии на Чернобыльской атомной станции: Тез. докл. I Междунар. конф. 10—18 сентября 1990 г., Зеленый мыс. М.: АН СССР, 1990. С. 175.
62. Пелевина И.И., Гуменюк М.А., Саенко А.С., Сынзыныс Б.И., Ващенкова И.И. // Биологические и радиоэкологические аспекты последствий аварии на Чернобыльской атомной станции: Тез. докл. I Междунар. конф. 10—18 сентября 1990 г., Зеленый мыс. М.: АН СССР, 1990. С. 174.

Всероссийский научно-исследовательский институт
сельскохозяйственной радиологии и агрозоологии
РАСХН, Обнинск

Поступила в редакцию
22.07.92

R.M. Alexakhin

RADIOECOLOGICAL LESSONS OF CHERNOBYL

*Russian Research Institute of Agricultural Radiology and Agroecology,
Russian Academy of Agricultural Sciences, Obninsk*

This paper presents the results of radioecological studies undertaken within the area exposed to ionizing radiation after Chernobyl disaster. Conclusions are made concerning the major regularities in radionuclide migration within various natural media and action of ionizing radiation on natural and artificial ecosystems. The efficiency of basic protective ecological measures in eliminating the accident consequences has been determined. The contribution of radioecological studies to the elimination of Chernobyl disaster sequences assessed.