ВОПРОСЫ РАДИАЦИОННОЙ БЕЗОПАСНОСТИ 2003 №4

ЖУРНАЛ ПРОИЗВОДСТВЕННОГО ОБЪЕДИНЕНИЯ "МАЯК"

TM

УДК 547:539.16.047
© 2003

РЕТРОСПЕКТИВНЫЙ ОБЗОР РАДИОЭКОЛОГИЧЕСКИХ ИССЛЕДОВАНИЙ НА УРАЛЕ

И.В. Молчанова, В.Н. Позолотина
Россия, г. Екатеринбург, Институт экологии растений и животных УрО РАН

Изложены основные вехи становления и развития отечественной школы радиоэкологии от первых основополагающих учений В.И. Вернадского и В.Н. Сукачева через экспериментальную радиационную биогеоценологию Н.В. Тимофеева-Ресовского и радиационную агроэкологию В.М. Клечковского до современных радиоэкологических исследований, проведенных в зонах радионуклидного загрязнения Уральского региона.

История становления и развития радиоэкологии в нашей стране неотделима от общей истории мировой науки. Однако радиоэкология имеет определенную специфику, некоторые ее разделы довольно долго были недоступны широкой научной общественности [1]. Наша задача — рассказать о становлении отечественных школ радиоэкологов, которые сформировались в середине XX в. на Урале, о наиболее выдающихся ученых, о продуктивных идеях, которые впервые были разработаны здесь, обогатив мировую науку в целом.

Особую роль в становлении радиоэкологии играют труды В.И. Вернадского. Разработанное им учение о живом веществе и биосфере Земли имело колоссальное мировоззренческое значение [2]. Кроме того, им были проведены и первые экспериментальные радиоэкологические исследования по выявлению закономерностей накопления радия живыми организмами [3]. Идея об организованности биосферы получила блестящее развитие в трудах В.Н. Сукачева о биогеоценозах как элементарных единицах биосферы [4]. А оценка результатов геохимической деятельности живых организмов составила основу учения о биохимии и геохимии ландшафтов [5, 6].

Широкомасштабные работы, развернувшиеся в мире в середине XX столетия по созданию ядерного оружия, обусловили поступление в биосферу огромного количества искусственных делящихся материалов. Мировому научному сообществу стало ясно, что фактически сформировался новый глобально действующий экологический фактор – искусственные радионуклиды и порождаемые ими ионизирующие излучения. Осознание важности проблемы взаимодействия живых организмов друг с другом и со средой обитания в условиях радиоактивного загрязнения и повышенного фона радиации привело к созданию новой научной дисциплины — радиационной биогеоценологии или радиоэкологии. Название научной дисциплины, постановка основных целей и задач появились практически одновременно и независимо друг от друга в работах русских исследователей В.М. Клечковского, Н.В. Тимофеева-Ресовского, А.А. Передельского [7, 8, 9] и американских Е. Одума, П. Плэтта [10, 11]. В радиоэкологии выделялись два взаимосвязанных направления, в задачу первого входило изучение закономерностей накопления, миграции и распределения радионуклидов в природных биогеоценозах, второе — изучало влияние ионизирующих излуче-

ний на популяции, сообщества и экосистемы.

Исторически так сложилось, что Уральский регион стал местом рождения радиоэкологии в России. Условно можно выделить две школы, основоположниками которых явились Н.В. Тимофеев-Ресовский и В.М. Клечковский. Принципиального противоречия между лидерами не было, разобщенность школ была обусловлена причинами политического, а не научного характера. Под руководством Н.В. Тимофеева-Ресовского развивались преимущественно фундаментальные аспекты радиоэкологии, работы велись в основном в экспериментальных условиях и результаты публиковались в открытой печати. Коллективы под руководством В.М. Клечковского работали в условиях секретности на обширных природных полигонах, загрязненных в результате штатной деятельности и аварийных ситуаций на ПО «Маяк».

ШКОЛА Н.В. ТИМОФЕЕВА-РЕСОВСКОГО

Исследования в области радиоэкологии были начаты Н.В. Тимофеевым-Ресовским в 1947 г. в лаборатории «Б» предприятия п/я 0215 и продолжены в 1955 г. в Институте биологии УФАНа. С этого времени Институт биологии, в настоящее время Институт экологии растений и животных УрО РАН, стал одним из признанных центров, где до настоящего времени проводятся масштабные радиоэкологические исследования и развивается научная школа, созданная Н.В. Тимофеевым-Ресовским. Уже в первые годы он поставил серьезную задачу — изучение вопросов, связанных с возможностью воздействия на биосферу интенсивно развивающейся атомной промышленности.

В рамках сформулированной им концепции экспериментальной радиационной биогеоценологии [8, 12] было предложено рассматривать радиоактивные изотопы в качестве «меченых» атомов, а ионизирующие излучения как удобный и легко дозируемый фактор воздействия на живые организмы. Основной базой для проведения работ служила биофизическая станция «Миассово», расположенная в Ильменском заповеднике Челябинской области. Здесь Н.В. Тимофеев-Ресовский с сотрудниками (Н.В. Лучник, А.А. Титлянова, Е.А. Тимофеева-Ресовская, Н.А. Порядкова, Н.В. Куликов, Б.М. Агафонов, Л.С. Царапкин, Н.А. Тимофеева, Е.М. Пребраженская, Е.Е. Сокурова, Г.И. Махонина, С.А. Любимова, И.В. Молчанова, М.Я. Чеботина, В.Г. Куликова, Н.М. Макаров, Е.Н. Караваева, П.И. Юшков, А.А. Позолотин, С.В. Тарчевская, Л.К. Альшиц, Э.А. Гилева) провели многочисленные экспериментальные работы по изучению поведения радионуклидов в упрощенных системах (почва—раствор—растение и вода—грунты—гидробионты) и оценке биологического действия ионизирующих излучений на живые организмы. Результаты этих исследований позволили провести классификацию радионуклидов по типу их поведения в экосистемах и выделить факторы, управляющие их подвижностью. В работах этого периода существенное место отводилось исследованию роли живых организмов в накоплении радионуклидов и их перераспределении по основным компонентам биогеоценозов [12—15]. Для количественного сравнения накопительной способности организмов широко использовалось понятие коэффициента накопления. Пределы накопления радионуклидов оказались чрезвычайно широки как для различных элементов, так и для разных видов организмов. В специальных опытах на модельных сообществах наземных растений, почвенных микроорганизмов, пресноводного перифитона в условиях радиоактивного загрязнения были показаны типичные изменения в этих комплексах — от радиостимуляции до нарушений их видового состава и структуры [16—18]. Отметим, что изучение радиочувствительности и радиопатологии живых организмов — это задача радиобиологии, в данной статье мы касаемся основных положений радиобиологии лишь в той мере, насколько они важны для радиоэкологии.

В 60—70-х годах дальнейшую стратегию развития радиоэкологии определили массовые испытания ядерного оружия. Главное направление исследований включало в себя изучение закономерностей миграции и распределения глобальных радиоактивных выпадений в различных

природных экосистемах суши, внутренних водоемов и морей. Обобщение получаемых данных легло в основу прогнозирования последствий радиоактивного загрязнения биосферы, экологического нормирования этих загрязнений в компонентах природной среды [19—24].

Основываясь на фундаменте, заложенном Н.В. Тимофеевым-Ресовским, в многолетних исследованиях сотрудниками лаборатории была выявлена и оценена роль ведущих физико-химических и экологических факторов среды (видовые особенности организмов, кислотность, свет, температура окружающей среды, сезон года и др.) на поведение антропогенных радионуклидов в разных типах экосистем [25—30]. Большое внимание было уделено изучению радиочувствительности основных лесообразующих пород Уральского региона с учетом всех типов внутривидовой изменчивости организмов, а также модифицирующего влияния на радиочувствительность биогенных и абиогенных факторов среды обитания [31—34].

В 1979 г. биофизическая станция «Миассово» была закрыта, экспериментальная база лаборатории, которая к тому времени расширилась до Отдела континентальной радиоэкологии, разместилась в непосредственной близости от Белоярской АЭС в пос. Заречный. В круг интересов сотрудников вошли проблемы влияния на окружающую среду бурно развивающейся атомной энергетики, от добычи ядерного топлива до эксплуатации АЭС. Мониторинговыми исследованиями 30-км зоны БАЭС, которые проводятся около 25 лет, были охвачены наземные и водные экосистемы. Изучение радиоэкологической ситуации в водоеме-охладителе АЭС позволило выделить зоны повышенного накопления искусственных радионуклидов. За время эксплуатации станции в водоем-охладитель поступило примерно 125 ГБк ^{90}Sr и 670 ГБк ^{137}Cs, большая их часть депонирована в донных отложениях, а также 16 ТБк трития, который практически полностью остается в воде. В гидробионтах в силу их малого веса содержится менее 0,01 % радионуклидов от общего их поступления, однако живые организмы являются активным и важным компонентом экосистемы, влияющим на процессы перераспределения радионуклидов. Виды с особо высокой накопительной способностью использовались в качестве индикаторов радионуклидного загрязнения [35—37]. Показано, что газоаэрозольные выбросы АЭС не оказывают ощутимого влияния на загрязнение искусственными радионуклидами примыкающих наземных экосистем. Наибольшее влияние станции испытывала Ольховская болотно-речная экосистема, в которую длительное время поступали сбросные воды станции [38, 39].

Комплексные исследования были проведены в районе крупного уранового месторождения в пределах Алданского нагорья. Показано, что в формировании загрязнения преобладает аэральный путь поступления радионуклидов с продуктами выветривания горных пород. Дозовая нагрузка на живые организмы определяется в основном внешним гамма-фоном. Обнаружена повышенная жизнеспособность и радиоустойчивость семенных генераций растений, сформировавшихся в условиях радиоактивного загрязнения [40, 41].

В 90-е годы коллектив Отдела получил возможность проводить исследования на природных полигонах, загрязненных в результате штатной деятельности и аварийных ситуаций на ПО «Маяк», где в течение многих лет в условиях секретности плодотворно работали радиоэкологи из разных учреждений страны.

ШКОЛА В.М. КЛЕЧКОВСКОГО

Другим основоположником радиоэкологии в России является В.М. Клечковский. В 1948 г. он возглавил одно из первых учреждений, занимавшихся проблемами изучения поведения искусственных радионуклидов в агросфере — биофизическую лабораторию Московской сельскохозяйственной академии им. К.А. Тимирязева. Вскоре после своего образования лаборатория стала играть роль важнейшего научного центра, в котором были проведены многочисленные экспериментальные работы по почвенной химии искусственных радионуклидов и их поступлению в растения [7, 42]. За комп-

лекс работ по агрохимии продуктов ядерного деления ведущим сотрудникам лаборатории (В.М. Клечковскому, И.В. Гулякину, А.Г. Шестакову, С.П. Целищеву) в 1952 г. была присуждена Сталинская премия.

Осенью 1957 г. в результате аварии на ПО «МАЯК», названной впоследствии Кыштымской, в окружающую среду было выброшено около 740 ПБк радиоактивных веществ, из которых более 74 ПБк были рассеяны ветром на территории Челябинской и Свердловской областей. Выпадая на поверхность почвенно-растительного покрова, техногенные радионуклиды сформировали Восточно-Уральский радиоактивный след (ВУРС). В связи с этой ситуацией на территории ВУРСа в 1958 г. в 15-ти км от г. Озерска была создана Опытная научно-исследовательская станция (ОНИС) химкомбината «Маяк». Организовать ОНИС было поручено консультанту по атомной энергии при Совете министров СССР, академику ВАСХНИЛ В.М. Клечковскому. Ему пришлось затратить много сил и энергии, чтобы привлечь к работам специалистов смежных научных учреждений. На Опытной станции активно работали сотрудники Почвенного института им. В.В. Докучаева, Зоологического института, Ботанического института им. В.Л. Комарова, Лаборатории лесоведения, Института эволюционной морфологии и экологии животных им. А.Н. Северцова, Института общей генетики. Кроме того, следует отметить работы учреждений ВАСХНИЛ, Главного управления гидрометслужбы, и Московского государственного университета им. М.В. Ломоносова.

В состав ОНИСа было включено семь лабораторий, работавших над проблемами: 1) распределение и миграция радиоактивных веществ в окружающей среде; 2) поступление радионуклидов в урожай сельскохозяйственных культур и продукцию животноводства; 3) способы дезактивации почв; 4) агрохимические способы снижения поступления радионуклидов в урожай; 5) разработка способов очистки продукции, полученной на загрязненной территории; 6) оценка генетических последствий радиоактивного загрязнения для флоры и фауны, 7) вопросы поведения радионуклидов в речных и озерных экосистемах. Первым директором ОНИСа был начальник ЦЗЛ ПО «Маяк» Г.А. Середа. Впоследствии станцией руководили Н.А. Корнеев, Е.А. Федоров, Г.Н. Романов. Бессменным координатором работ, проводившихся на станции, являлся В.М. Клечковский. Фактически в это время он вплотную подошел к разработке концепции сельскохозяйственной радиоэкологии и формулировке основных задач этого направления. Труды В.М. Клечковского и его сотрудников в этой области науки являются основополагающими.

В результате концентрации усилий многих специалистов уже в 1958—1959 гг. были получены исходные данные о содержании радионуклидов в различных почвах, о поступлении их в урожай разных сельскохозяйственных культур и модифицирующем действии минеральных удобрений (Л.Н. Соколова, А.В. Егоров, Л.П. Маракушина, Р.П. Пашкова, Е.В. Рябова). Решалась проблема получения «чистой продукции» с загрязненных земель, разрабатывались специальные технологии возделывания и обработки сельскохозяйственных культур (Г.С. Мешалкин, В.А. Семенов, В.П. Костырев). Главными приемами рекультивации были признаны глубокая вспашка, удаление или захоронение поверхностного загрязненного слоя почв (Н.Н. Самарина, Е.Р. Рябова, Л.П. Маракушина, И.Г. Тепляков) [43].

Обстановка в районе ВУРСа осложнилась в 1967 г. за счет ветрового переноса радионуклидов с береговой зоны оз. Карачай, которое служило естественным хранилищем радиоактивных отходов ПО «МАЯК». После этого события были оценены уровни радиационного воздействия на вновь загрязненных территориях. Интенсивно разрабатывались методы контроля, позволяющие прогнозировать плотности загрязнения природных участков (Г.Н. Романов, Е.И. Андреев). Восточно-Уральский заповедник фактически стал полигоном для эксперимента в природе, аналогов которому не было нигде в мире.

В ходе дальнейших работ был получен первый опыт крупномасштабного картирования загрязненных территорий (В.Л. Андроников), до-

полненного геоботаническими исследованиями (Е.Г. Смирнов, Т.Л. Кожевникова), изучено распределение радионуклидов в почвах, в зависимости от комплекса условий в природных биогеоценозах (Б.С. Пристер, Н.П. Архипов, А.В. Егоров). Были проведены фундаментальные исследования по агрохимии и изучению форм ^{90}Sr в почвах (Н.П. Архипов, В.Ф. Гольцев), созданы и внедрены в практику новые высокочувствительные инструментальные методы количественного определения бета- и гамма-излучателей в объектах окружающей среды (Г.И. Антоненко). Были разработаны методы экологической дозиметрии, а также принципы учета радиационных биологических эффектов для многих видов растений и животных (Г.Н. Романов, Ф.А. Тихомиров) [43]. В 1974 г. за работы, выполненные на территории ВУРСа, группе исследователей (В.М. Клечковский, Р.М. Алексахин, И.К. Дибобес, И.Я. Панченко, А.П. Поваляев, Б.С. Пристер, Г.Н. Романов, Н.А. Семенов, Е.Н. Теверовский, И.А. Терновский, Е.А. Федоров) была присуждена Государственная премия.

С конца 70-х годов коллективом ОНИСа под руководством Е.А. Федорова и Г.Н. Романова, а также сотрудниками ГЕОХИ под руководством Б.Ф. Мясоедова были выполнены фундаментальные исследования по оценке поведения в окружающей среде плутония – одного из наиболее значимых с радиотоксикологической точки зрения элементов (Ф.И. Павлоцкая, Т.А. Горяченкова, А.С. Воронов, А.С. Бакуров). Была показана роль животных и растений в миграции радионуклидов в природных экосистемах, выявлены первичные изменения в популяциях разных видов растений и животных от действия радиации, а также вторичные эффекты, связанные с нарушением биогеоценотических связей (В.Е. Соколов, Е.А. Федоров, Ф.А. Тихомиров, А.И. Ильенко, Д.А. Криволуцкий, А.Д. Покаржевский, Д.А. Спирин, Р.П. Пономарева). Дана оценка восстановительного потенциала популяций и экосистем, проведен анализ отдаленных последствий радиоактивного загрязнения (В.А. Шевченко, Ф.А. Тихомиров, Р.М. Алексахин, Л.В. Чережанова, Е.Г. Смирнов).

Работы в области лесной радиоэкологии представляли значительный интерес, поскольку в случае массированных радиоактивных выпадений леса являются критическими экосистемами. Они аккумулируют радионуклиды и формируют наибольшие дозовые нагрузки на человека. В работах Ф.А. Тихомирова, Р.М. Алексахина, Р.М. Карабань, Д.А. Спирина, Н.Н. Мишенкова было показано, что разные типы леса обладают большой задерживающей способностью по отношению к радионуклидам, нередко повышенной радиочувствительностью, и медленным самоочищением надземной фитомассы [21, 43]. Это замедляет процессы круговорота химических элементов и создает условия для хронического облучения растений и животных, обитающих в лесах. Результаты этих исследований дали ценный материал для построения пространственно-временных моделей перераспределения радионуклидов в пределах лесного биоценоза, которые в свою очередь необходимы для разработки научно обоснованных рекомендаций по ведению лесного хозяйства на территориях с повышенным содержанием радионуклидов.

К сожалению, информация о радиационной ситуации на Урале долго оставалась секретной, результаты частично были представлены в статьях и книгах без указания условий загрязнения местности [21, 44, 45]. Фактически только после аварии на Чернобыльской АЭС данные исследований стали достоянием радиоэкологической науки и наиболее полно отражены в коллективных монографиях [46—48].

В результате деятельности ПО «Маяк» около полумиллиона жителей Уральского региона подверглись облучению в повышенных дозах. Для решения проблем безопасного проживания населения в условиях радионуклидного загрязнения в 1962 г. в г. Челябинске был организован Филиал института биофизики № 4 (ФИБ-4). В целом задачи, стоящие перед этим коллективом и сотрудниками ОНИСа, тесно переплетались, но лишь с той разницей, что ФИБ должен был в основном исследовать состояние здоровья населения на загрязненных территориях. Сотрудниками филиала (А.И. Скрябин,

Р.И. Погодин, З.Г. Антропова, В.А. Батурин, М.О. Дегтева) были проведены исследования на территории ВУРСа и в пределах р. Течи по оценке поведения радионуклидов в объектах внешней среды. Результаты работ в настоящее время опубликованы в открытой печати [49, 50]. В разные годы ФИБ-4 возглавляли И.К. Дибобес, В.Л. Шведов, а в 1992 г. ФИБ-4 был реорганизован в Уральский научно-практический центр радиационной медицины под руководством А.В. Аклеева.

Деятельность химкомбината «Маяк» в первые годы его существования помимо Кыштымской аварии создала критическую радиационную ситуацию на р. Тече, в которую в течение ряда лет сбрасывали радиоактивные отходы без очистки и нормирования. В то время не было разработано надежных технологий обращения с радиоактивными отходами, в результате вода, донные отложения, биота, пойменные ландшафты р. Течи оказались загрязнены долгоживущими радионуклидами. Первые работы по оценке уровней загрязненности компонентов р. Течи и ее пойменных участков выполнялись сотрудниками ОНИСа под руководством сотрудника ИПГ Е.Н. Теверовского и начальника ЦЗЛ Д.И. Ильина, а позднее Е.А. Федорова, Г.Н. Романова. Было установлено, что основным источником загрязнения речной системы является заболоченный участок поймы в верховье р. Течи. В конце 50-х годов река была загрязнена настолько, что ее радиоактивный сток в устье составлял 7,4—18,5 ТБк в год, позднее были получены уникальные данные по вторичному загрязнению реки стронцием [43].

Наряду с речной системой внимание исследователей привлекали многочисленные озера, расположенные на загрязненных территориях. В поставарийный период были получены данные по их морфологии, гидрохимии, гидробиологии и радионуклидному составу воды. Результаты позволили оценить запасы радионуклидов в основных компонентах водоемов и показать, что основное их количество депонировано в донных отложениях. Был отмечен эффект вымораживания, сводящийся к снижению концентрации радионуклидов в воде в весенне-летний период и максимальному ее увеличению зимой. Независимо этот феномен был получен сотрудниками ИЭРиЖ на биостанции «Миассово» [51]. Позднее установленный эффект стал основой для разработки промышленных методов дезактивации воды [52]. Было отмечено хорошее соответствие данных лабораторных опытов и натурных исследований в распределении и накоплении радионуклидов в органах и тканях рыб (Е.А. Федоров, А.Я. Коготков, Л.А. Аненков, В.Г. Осипов, Т.А. Антонова). В дальнейшем оценили биологические показатели у некоторых видов рыб, обитающих в условиях радионуклидного загрязнения (С.П. Пешков), рассчитали величину дозовых нагрузок на внутренние органы и икру рыб (Г.Н. Романов, Г.П. Шейн) [43].

Работы сотрудников ОНИСа в 90-е годы носили в основном обобщающий характер. В результате было создано целостное представление о миграции основного загрязнителя ^{90}Sr в почвенно-растительном покрове ВУРСа [53]. Было оценено состояние природных популяций животных на примере мышевидных грызунов, обитающих длительное время в условиях радионуклидного загрязнения [54]. Представлена многолетняя динамика радиационной обстановки на территории ВУРСа [55]. Проведена оценка возможности хозяйственного использования основной и побочной продукции леса, произрастающего на участках с различными уровнями загрязненности [56]. В 1998 г. было принято решение о реорганизации ОНИС, и она была введена в состав ЦЗЛ ПО «Маяк» (откуда, собственно, и началась ее история).

ПОСТЧЕРНОБЫЛЬСКИЙ ЭТАП РАДИОЭКОЛОГИЧЕСКИХ ИССЛЕДОВАНИЙ В УРАЛЬСКОМ РЕГИОНЕ

В 90-х годах с принятием Государственной программы Российской Федерации по радиационной реабилитации Уральского региона началось открытое комплексное исследование загрязненных территорий ВУРСа и речной системы Теча-Исеть. Программа была разработана бла-

годаря усилиям инициативной группы, в состав которой вошли представители Минатома СССР, администраций Челябинской, Свердловской, Курганской областей и УрО РАН. Радиоэкологический раздел программы охватывал широкий круг вопросов от оценки современных уровней загрязнения компонентов окружающей среды и выявления закономерностей ландшафтной миграции радионуклидов на территории Уральского региона до реконструкции начального загрязнения и расчета накопленных населением доз. Генеральным научным руководителем и координатором программы явился Институт промышленной экологии УрО РАН во главе с В.Н. Чукановым.

В проведении научных исследований самое непосредственное участие принимали сотрудники Института экологии растений и животных УрО РАН. Ими было показано, что процессы геохимического перераспределения радиоактивных веществ в результате ветрового переноса и поверхностного стока на территории ВУРСа не привели к его расширению. Наибольшие концентрации ^{90}Sr наблюдаются в пределах центральной оси ВУРСа, и они значительно снижаются к периферии. Оценка общих запасов радионуклидов, выполненная с использованием оригинальных методических приемов, показала, что в результате Кыштымской аварии на территорию ВУРСа поступило 0,1—0,4 ПБк ^{90}Sr, что удовлетворительно согласуется с оценками, полученными другими авторами. Количество ^{137}Cs, привнесенного в 1967 г. с берегов оз. Карачай, оказалось значительно выше официальных оценок и равно 72 ТБк. Различия обусловлены, по-видимому, заниженной оценкой поступления радионуклидов из этого источника. Кроме того, показано, что в результате Кыштымской аварии и ветрового переноса с оз. Карачай в окружающую среду поступило не менее 1 ТБк $^{239,240}Pu$. Концентрация ^{90}Sr в различных частях древесных растений в зоне ВУРСа в 2—30 раз превышает фоновый уровень, причем это избыточное загрязнение зависит не только от содержания радионуклида в почве, но и от его распределения в почвенном профиле и от видовых особенностей растений [57—59]. Длительное исследование локальных ценопопуляций одуванчика из зоны ВУРСа позволило выявить весь спектр эффектов, описанных при пролонгированном действии малых доз радиации (стимулирующий, подавляющий, индифферентный). Обнаруженная нестабильность является, вероятно, свидетельством того, что малые дозы индуцируют нелетальные изменения в геноме, реплицирующиеся в чреде поколений [60]. При оценке отдаленных эффектов хронического облучения сотрудников ПО «Маяк» и населения загрязненных регионов обнаружены некоторые отклонения в состоянии их здоровья [61]. Современные исследования разных видов животных из зоны ВУРСа выявили у них повышенную генетическую нестабильность [62, 63]. Изучение группы озер центральной зоны ВУРСа (Тыгиш, Червяное, Сунгуль) показало, что концентрации ^{90}Sr в воде со временем уменьшились на порядок величин. Основное количество радионуклидов по прежнему депонировано в слое донных отложений, мощность которого более 100 см [64].

В период с 1996 по 2003 гг. были опубликованы коллективные монографии [65, 66], в которых авторским коллективом (А.В. Баженов, А.Н. Вараксин, П.В. Волобуев, М.В. Жуковский, М.В. Изюмов, В.С. Казанцев, Б.А. Кацнельсон, Б.А. Коробицын, А.П. Кулигин, Е.В. Ползик, Л.И. Привалов) были подведены итоги исследований, проведенных в рамках Государственной программы. В книгах представлены данные о современных уровнях и характере распределения ^{90}Sr и ^{137}Cs в почвенно-растительном покрове на территории Уральского региона. Показано, что наибольшее остаточное загрязнение локализовано в южной части Каменского района. Корректно рассчитаны накопленные дозы облучения населения, проживающего на загрязненных территориях. Дана оценка состоянию здоровья людей разных возрастных групп. Региональная научно-практическая конференция «ВУРС-45», состоявшаяся в г. Озерске в 2002 г., подвела итог последствиям радиационной аварии и выявила текущие проблемы реабилитации Уральского региона [67].

Радиоэкологические исследования речной

системы Теча-Исеть-Тобол-Иртыш-Обь свидетельствуют о том, что современные уровни радиоактивного загрязнения р. Течи и прилегающих пойменных ландшафтов по-прежнему очень высоки. Сделанные расчеты показывают, что большая часть сброшенных радионуклидов (100 ПБк) находится в каскаде водохранилищ в верховье р. Течи, около 15 % содержится в реке и пойменных почвах. Более 1 ПБк радиоактивных материалов сформировали радиоактивный след в Обь-Иртышской речной системе и мигрировали в Северные моря [68, 69]. Современный интерес к проблеме загрязнения р. Течи сводится к изучению компонентов самой реки, ее пойменных участков и реконструкции доз облучения населения, проживающего по ее берегам [70, 71]. С помощью архивных данных, математических моделей и использования метода электронного парамагнитного резонанса делаются попытки реконструировать дозы облучения населения [66], а также восстановить радионуклидный состав первичных загрязнений р. Течи и подробно проанализировать ущерб здоровью населения [50].

В настоящее время радиоэкологическая ситуация в Уральском регионе остается напряженной. Большое опасение вызывает состояние подземной гидросферы в районе действия ПО «Маяк». Оз. Карачай и Теченский каскад водоемов приводят к загрязнению как подземных вод, так и горных пород водовмещающего горизонта [72]. Имеет место миграция и биогенный вынос радионуклидов, в том числе и плутония, в окружающую среду из твердых радиоактивных отходов, захороненных в грунтовые могильники [73]. Продолжается работа Белоярской АЭС, ведется строительство четвертого блока.

Авария на Чернобыльской АЭС по своим масштабам превзошла все известные ядерные инциденты и обусловила характерный пик уровня радиоактивности повсеместно на суше и на море. Опыт специалистов-радиоэкологов, накопленный в работах на радионуклидно-загрязненных территориях Уральского региона, был востребован в этой ситуации в полной мере [74].

Ушел в прошлое XX век, но проблемы ядерных технологий, которые он породил, остались. Опасность радиационного фактора, отмеченная еще на ранних этапах становления радиоэкологии, с течением времени не только не уменьшилась, но постоянно возрастает. В этой связи в контексте законов общей экологии, помимо традиционных задач радиационной биогеоценологии, особую актуальность приобретают проблемы радиационной безопасности, экологического нормирования и прогнозирования отдаленных последствий действия малых доз радиации на биоту.

ЛИТЕРАТУРА

1. A. Aarkrog, G.G. Polikarpov Development of radioecology in East and West // Radioecology and the Restoration of Radioactive-Contaminated Sites / Ed. By F. Luykx and M. Frissel. NATO ASI Series 2: Environment. — Vol. 13. Dordrecht, Boston, London: Kluwer Academic Publishers, 1996. — P. 17—30.
2. Вернадский В.И. Биосфера. — Л.: Науч. хим.-техн. изд-во, 1926. — 146 с.
3. Вернадский В.И. О концентрации радия живыми организмами // Доклады АН СССР. — 1929. — № 2. — С. 33—34.
4. Сукачев В.Н. Основы теории биогеоценологии // Юбилейный сборник, посвященный 30-летию Великой Октябрьской революции. — Ч. 2. — М.-Л.: Изд-во АН СССР, 1947. — С. 283—304.
5. Полынов Б.Б. Избранные труды / Отв. ред. И.В. Тюрин, А.П. Сауков. — М.: Изд-во АН СССР, 1956. — 751 с.
6. Виноградов А.П. Геохимия редких и рассеянных химических элементов в почвах. — М.: Изд-во АН СССР, 1957. — 238 с.
7. О поведении радиоактивных продуктов деления в почвах, их поступлении в растения и накоплении в урожае / Под ред. В.М. Клечковского. — М.: Изд-во АН СССР, 1956. — 177 с.
8. Тимофеев-Ресовский Н.В. Применение излучений и излучателей в экспериментальной биогеоценологии // Бот. журн. — 1957. — Т. 42. — № 2. — С. 161—194.

9. Передельский А.А. Основания и задачи радиоэкологии // Журн. общ. биол. — 1957. — Т. 18. — № 1. — С. 17—30.
10. Odum E.P. Radiation ecology. In Fundamentals of Ecology. Philadelphia, Penna, W.B.Saunders Co, 1957. — P. 452.
11. Platt P.B. Long-range effects of radiation on natural plant populations of the granite outcrops in the Southeastern U.S. AEC progress report. 1957.
12. Тимофеев-Ресовский Н.В. Некоторые проблемы радиационной биогеоценологии // Докл. д-ра. биол. наук. — Свердловск, 1962. — 53 с.
13—15. Труды Института биологии УФАН СССР. — Вып. 9, 12, 22 / Сб. работ лаборатории биофизики. — 1957, 1960, 1962.
16. Куликов Н.В. Действие осколков урана на биомассу и структуру экспериментального фитоценоза // Бот. журн. — 1957. — Т. 42. — № 3. — С. 252—292.
17. Тимофеева-Ресовская Е.А. Распределение радиоизотопов по основным компонентам пресноводных водоемов. — Свердловск, 1963. — 78 с.
18. Радиоактивность почв и методы ее определения / Под ред. Н.В. Тимофеева-Ресовского. — М.: Наука, 1966. — 258 с.
19. Алексахин Р.М. Радиоактивное загрязнение почвы и растений. — М.: Изд-во АН СССР, 1963. — 132 с.
20. Поликарпов Г.Г. Радиоэкология морских организмов. — М.: Атомиздат, 1964. — 295 с.
21. Тихомиров Ф.А. Действие ионизирующих излучений на экологические системы. — М.: Атомиздат, 1972. — 174 с.
22. Павлоцкая Ф.И. Миграция радиоактивных продуктов глобальных выпадений в почвах. — М.: Атомиздат, 1974. — 215 с.
23. Моисеев А.А., Рамзаев П.В. Цезий-137 в биосфере. — М.: Атомиздат, 1975. — 182 с.
24. Тюрюканова Э.Б. Радиогеохимия почв полесий Русской равнины (на примере Мещерской низменности). — М.: Наука, 1974. — 156 с.
25. Молчанова И.В., Куликов Н.В. О распределении ^{90}Sr и ^{137}Cs в почвенно-растительном покрове тундры // Докл. АН СССР. — 1970. — Т. 195. — № 4. — С. 959—961.
26. Проблемы радиоэкологии водных организмов // Труды Института экологии растений и животных УНЦ АН СССР. — 1971. — Вып. 78. — 145 с.
27. Куликов Н.В., Молчанова И.В. Континентальная радиоэкология. — М.: Наука, 1975. — 184 с.
28. Любимова С.А. Сорбция ^{90}Sr и ^{137}Cs донными отложениями пресноводного озера // Радиоэкология водных организмов: распределение и миграция радионуклидов в пресноводных и морских биоценозах. — Рига, 1973. — С. 96—101.
29. Нифонтова М.Г., Куликов Н.В. О накоплении ^{90}Sr и ^{137}Cs лишайниками в природных условиях // Экология. — 1977. — № 3. — С. 93—96.
30. Куликов Н.В., Чеботина М.Я. Радиоэкология пресноводных биосистем. — Свердловск, 1988. — 129 с.
31. Позолотин А.А., Тарчевская С.В. Влияние постоянного магнитного поля на гамма-облученные семена сосны обыкновенной // Действие ионизирующих излучений на гидробионты и наземные растения. — Свердловск, 1970. — С. 66—69.
32. Юшков П.И. Некоторые вопросы лесной радиоэкологии // Радиационный мутагенез и его роль в эволюции и селекции. — М.: Наука, 1987. — С. 145—151.
33. Порозова О.А. Радиочувствительность семян сосны в зависимости от их влажности и сроков хранения // Экология. — 1983. — № 3. — С. 82—84.
34. Позолотина В.Н., Куликов Н.В. Особенности пострадиационного восстановления в модельных популяциях березы // Экология. — 1988. — № 1. — С. 28—33.
35. Чеботина М.Я., Реч Т.А., Куликов Н.В. Тритий в зоне Белоярской АЭС им. И.В. Курчатова // Экология. — 1990. — № 2. — С. 34—39.
36. Чеботина М.Я., Трапезников А.В., Трапезникова В.Н. и др. Радиоэкологические исследования Белоярского водохранилища. — Свердловск, 1992. — 80 с.
37. Чеботина М.Я., Гусева В.П., Трапезников А.В. Планктон и его роль в миграции радио-

нуклидов в водоеме-охладителе АЭС. — Екатеринбург: УрО РАН, 2002. — 172 с.
38. Нифонтова М.Г., Маковский В.И., Куликов Н.В. ^{90}Sr и ^{137}Cs в торфяных залежах низинного болота в зоне влияния Белоярской АЭС // Экология. — 1986. — № 3. — С. 46—51.
39. Куликов Н.В., Молчанова И.В., Караваева Е.Н. Радиоэкология почвенно-растительного покрова. — Свердловск, 1990. — 172 с.
40. Михайловская Л.Н., Молчанова И.В., Караваева Е.Н. и др. Поведение тяжелых естественных радионуклидов в техногенных ландшафтах Южной Якутии // Экология. — 1996. — № 3. — С. 203—206.
41. Позолотина В.Н., Собакин П.И., Молчанова И.В. и др. Миграция и биологическое действие на растения тяжелых естественных радионуклидов // Экология. — 2000. — № 1. — С. 17—23.
42. Гулякин И.В., Юдинцева Е.В. Радиоактивные продукты деления в почве и растениях. — М.: Госатомиздат, 1962. — 276 с.
43. Опытная научно-исследовательская станция ПО «Маяк». Рефераты научных работ (Библиотека журнала «Вопросы радиационной безопасности») / Из архивов ПО «Маяк». — 2003. — № 3. — 88 с.
44. Алексахин Р.М., Нарышкин М.А. Миграция радионуклидов в лесных биогеоценозах. — М.: Наука, 1977. — 124 с.
45. Криволуцкий Д.А. Радиоэкология сообществ наземных животных. — М.: Энергоатомиздат, 1983. — 87 с.
46. Действие ионизирующей радиации на биогеоценоз / Под ред. М.С. Гилярова и Р.М. Алексахина. — М.: Наука, 1988. — 240 с.
47. Итоги изучения и опыт ликвидации последствий аварийного загрязнения территории продуктами деления урана / Под ред. А.И. Бурназяна. — М.: Энергоатомиздат, 1990. — 145 с.
48. Экологические последствия радиоактивного загрязнения на Южном Урале / Под ред. В.Е. Соколова и Д.А. Криволуцкого. — М.: Наука, 1993. — 336 с.
49. Экологические и медицинские последствия радиационной аварии 1957 года на ПО «Маяк» // Урал. науч.-практ. центр радиац. медицины (УНПЦ РМ) / Под ред. А.В. Аклеева, М.Ф. Киселева. — М., 2001. — 294 с.
50. Медико-биологические и экологические последствия радиоактивного загрязнения реки Течи / Под ред. А.В. Аклеева, М.Ф. Киселева. — М., 2000. — 531 с.
51. Чеботина М.Я., Боченин В.Ф., Куликов Н.В. Распределение ^{90}Sr и ^{137}Cs между водой и донными отложениями водоема в зависимости от сезона года // Экология. — 1980. — № 5. — С. 96—98.
52. Смагин А.И. Распределение радионуклидов в компонентах экосистемы залива водоема-хранилища отходов и оценка эффективности дезактивации воды методом вымораживания // Вопросы радиационной безопасности. — 1997. — № 1. — С. 64—70.
53. Мартюшов В.В., Спирин Д.А., Романов Г.Н. и др. Динамика состояния и миграции стронция-90 в почвах Восточно-Уральского радиоактивного следа // Вопросы радиационной безопасности. — 1996. — № 3. — С. 28—38.
54. Спирин Д.А., Тарасов О.В., Шейн Г.П. Современное состояние популяций животных, обитающих на территории Восточно-Уральского радиоактивного следа // Вопросы радиационной безопасности. — 1996. — № 3. — С. 39—44.
55. Бакуров А.С., Романов Г.Н., Шейн Г.П. Динамика радиационной обстановки на территории Восточно-Уральского радиоактивного следа // Вопросы радиационной безопасности. — 1997. — № 4. — С. 68—74.
56. Мартюшова Л.Н., Романов Г.Н., Базылев В.В. и др. О возможности хозяйственного использования основной и побочной продукции леса на территории ВУРСа // Вопросы радиационной безопасности. — 1998. — № 3. — С. 35—39.
57. Почвенно-экологические условия накопления и перераспределения радионуклидов в зоне ВУРСа / В.П. Фирсова, И.В. Молчанова, П.В. Мещеряков и др. — Екатеринбург, 1996. — 140 с.
58. Ааркрог А., Дальгаард Х., Нильсен С.П. и др. Изучение вклада наиболее крупных ядерных инцидентов в радиоактивное загрязнение Уральского региона // Экология. — 1998. — № 1. — С. 36—42.

59. Молчанова И.В. Караваева Е.Н. Эколого-геохимические аспекты миграции радионуклидов в почвенно-растительном покрове. — Екатеринбург: УрО РАН, 2001. — 161 с.
60. Позолотина В.Н. Исследование локальных ценопопуляций одуванчика (*Taraxacum officinale* s.l.) из радиоактивно загрязненных зон // Экология. — 2001. — № 3. — С. 117—124.
61. Кошурникова Н.А.. Шильникова Н.С., Окатенко П.В. и др. Характеристика когорты рабочих атомного предприятия ПО «Маяк» // Вопросы радиационной безопасности. — 1998. — № 2. — С. 46—55.
62. Любашевский Н.М. Пашнина И.А. Оценка здоровья среды в окрестностях города Озерска: (Данные биоиндикации) // Труды и матер. региональной научно-практической конференции «ВУРС-45». — Озерск: РИЦ ВРБ, 2002. — С. 167—187.
63. Васильев А.Г., Васильева И.А., Большаков В.Н. Фенетический мониторинг популяций красной полевки (*Clethrionomys rutilus* Pall.) в зоне Восточно-Уральского радиоактивного следа // Экология. — 1996. — № 2. — С. 117—124.
64. Трапезников А.В., Юшков П.И., Николкин В.Н. и др. Радионуклиды в экосистеме озера Тыгиш на территории Восточно-Уральского радиоактивного следа // Экология. — 2003. — № 3. — С. 184—193.
65. Восточно-Уральский радиоактивный след (Свердловская область) / Под ред В.Н. Чуканова. — Екатеринбург: ИПЭ УрО РАН, 1996. — 168 с.
66. Последствия техногенного радиационного воздействия и проблемы реабилитации Уральского региона / Под общей ред. С.К. Шойгу. — М.: Изд-во «Комтехпринт», 2002. — 287 с.
67. Труды и материалы региональной научно-практической конференции «ВУРС-45». - Озерск: РИЦ ВРБ, 2002.
68. Трапезников А.В., Позолотина В.Н., Молчанова И.В. и др. Радиоэкологическая характеристика речной системы Теча-Исеть // Экология. — 2000. — № 4. — С. 248—256.
69. Trapeznikov A.V., Pozolotina V.N., Chebotina M. e. a. Radioactive contamination of the Techa river, the Urals // Health Physics. — 1993. — Vol. 65. — № 5. — P. 481—488.
70. Молчанова И.В., Караваева Е.Н., Позолотина В.Н. и др. Закономерности поведения радионуклидов в пойменных ландшафтах реки Течи на Урале // Экология. — 1994. — № 3. — С. 43—49.
71. Позолотина В.Н., Трапезников А.В., Кабианка Т. и др. Расчет дозовых нагрузок населения пос. Бродокалмака от загрязнения р. Течи // Атомная энергия. — 2000. — Т. 88, вып. 1. — С. 60—66.
72. Дрожко Е.Г., Иванов И.А., Самсонова Л.М. и др. Гидрогеологические условия района озера Карачай и численное моделирование миграции загрязнений в подземные воды // Вопросы радиационной безопасности. — 1996. — № 4. — С. 5—14.
73. Базылев В.В., Спирин Д.А., Мартюшов В.В. и др. Параметры миграции радионуклидов из грунтовых могильников твердых радиоактивных отходов // Вопросы радиационной безопасности. — 1997. — № 1. — С. 31—35.
74. Comparative assessment of the environmental impact of radionuclides released during three major nuclear accidents: Kyshtym, Windscale, Chernobyl // Proc. of Intern. Seminar. Luxemburg. — 1991. — V. 1. — 420 p. — V. 2. — 396 p.

Поступила в редакцию 22 июля 2003 г.