

ГОСУДАРСТВЕННАЯ КОМИССИЯ ПРИ СОВЕТЕ МИНИСТРОВ
СССР ПО ПРОДОВОЛЬСТВИЮ И ЗАКУПКАМ
ВСЕСОЮЗНЫЙ НАУЧНО-ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ ИНСТИТУТ
СЕЛЬСКОХОЗЯЙСТВЕННОЙ РАДИОЛОГИИ

На правах рукописи

МОЛЧАНОВА Инна Владимировна

РАДИОЭКОЛОГИЧЕСКИЕ АСПЕКТЫ ПОЧВЕННО-
РАСТИТЕЛЬНОГО ПОКРОВА

03.00.01 – радиобиология

Автореф.
диссертации на соискание ученой степени
доктора биологических наук

Свердловск – 1991

Работа выполнена в Институте экологии растений и животных
Уральского отделения АН СССР.

Официальные оппоненты

доктор биологических наук, профессор Б.С.Пристер - Госагропром
УССР (г.Киев)

доктор биологических наук Д.А.Кутлахмедов - Институт клеточной
биологии и генетической инженерии АН УССР (г.Киев)

доктор физико-математических наук В.Н. Чукалов - Научно-инженер-
ный центр экологической безопасности УрО АН СССР (г.Свердловск)

Ведущая организация:

Московский государственный университет им.М.В.Ломоносова

Задача диссертации состоится " " 1991 г. в
часов на заседании Специализированного совета № 120.81.01 при
Всесоюзном научно-исследовательском институте сельскохозяйствен-
ной радиологии Госкомиссии по продовольствию и закупкам при
Совете Министров СССР по адресу: г.Москва, Волков пер., 4

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке Всесоюзного
научно-исследовательского института сельскохозяйственной радиоло-
гии.

Отзывы просьба направлять по адресу: 249020, г.Обнинск,
Калужской области, ВНИИСХФ, Специализированный совет № 120.81.01.

Автореферат разослан " 1991 г.

Ученый секретарь
Специализированного совета
кандидат биологических наук

Н.И.Самжарова

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность проблемы. Экологические проблемы современной атомной промышленности и технологий со всей очевидностью проявились в середине 50-х годов текущего столетия, после того, как было показано, что при испытаниях ядерного оружия радиоактивные вещества через верхние слои атмосферы и тропосферу загрязняют биосферу земли в глобальном масштабе. В этот период формируется и быстро развивается новая область радиобиологии – радиоэкология, призванная изучать процессы взаимодействия живых организмов друг с другом и со средой их обитания в условиях радиоактивного загрязнения и соответственно повышенного фона ионизирующей радиации.

Одним из разделов радиоэкологии является континентальная радиоэкология, исследующая радиоэкологические процессы в биогеоценозах суши и внутренних водоемах (Куликов, Молчанова, 1975). В комплексе работ, связанных с этой областью науки, существенное место отводится радиоэкологическим исследованиям почвенно-растительного покрова. Именно почвенно-растительный покров биосфера является первым и основным депо при поступлении радиоактивных веществ из атмосферы на земную поверхность и их дальнейшей миграции. Эта тонкая наиболее насыщенная жизнью оболочка биосфера, является, вместе с тем, и наиболее чувствительной к повреждающим лучевым воздействиям в случае радиоактивного загрязнения.

С развитием ядерных технологий на предприятиях атомной промышленности и энергетики, все большее экологическое значение приобретают локальные радиоактивные загрязнения. Это предопределяет необходимость проведения радиоэкологических исследований в зонах, непосредственно примыкающих к штатноработающим атомно-энергетическим комплексам. Аварийные ситуации на таких комплексах, а также авария на Чернобыльской АЭС, обусловливают необходимость проведения широкомасштабных радиоэкологических исследований. Результаты подобных работ, наряду с характеристикой отдельных "горячих точек", становятся основой для разработки систем радиационного мониторинга почвенно-растительного покрова, организации землепользования в таких зонах и за их пределами.

Основная цель и задачи исследования. Цель настоящей работы заключается в обосновании необходимости развития радиоэкологии почвенно-растительного покрова как самостоятельной области современной радиобиологии, выяснении основных научных и прикладных проблем

этого направления и следований и разработки методических подходов для их решения. Для достижения поставленной цели требовалось решить следующие задачи:

1) в экспериментальных условиях оценить миграционную способность ряда экологически значимых искусственных и естественных радионуклидов (^{59}Fe , ^{60}Co , ^{90}Sr , ^{91}Y , ^{137}Cs , ^{144}Ce , ^{226}Ra , ^{232}Th , ^{238}U) в основных биогеоценотических звеньях почва-раствор, почва-растение и почва-растительный покров естественных биогеоценозов;

2) изучить влияние основных экологических и физико-химических факторов на степень подвижности указанных радионуклидов в системах различной сложности;

3) сравнить полученные данные с результатами исследований миграции некоторых из перечисленных радионуклидов в естественных условиях, при поступлении их в почвенно-растительный покров с глобальными радиоактивными выпадениями из атмосферы и в результате штатной эксплуатации атомных и тепловых электростанций;

4) выявить особенности миграции долгоживущих радионуклидов в почвенно-растительном покрове 30-километровой зоны аварии на Чернобыльской АЭС;

5) выделить составляющие компоненты наземных биогеоценозов, которые могут быть использованы в качестве индикатора радиоактивного загрязнения;

6) наметить практические способы снижения накопления радионуклидов растениями из почвы;

Научная новизна выполненной работы заключается в том, что сформулировано и разработано новое направление современной радиобиологии - радиоэкология почвенно-растительного покрова. Используя единый методологический подход, автор впервые проводит сравнительный анализ действия ряда экологических и физико-химических факторов среди (рН раствора, концентрация изотопных и неизотопных носителей, искусственных комплексонов, водных растительных экстрактов разлагающегося опада растений, режим почвенного увлажнения, температура), определяющих полноту поглощения изучавшихся радионуклидов в почвах и степень их подвижности в системах почва-раствор, почва-растение, почва-растительный покров естественных биогеоценозов и дает общую сравнительно феноменологическую характеристику их взведения в почвенно-растительном покрове. Выявляет роль коллоидооб-

разования, комплексообразования и некоторых других специфических реакций в поглощении и прочности закрепления радионуклидов в почвах.

На основании результатов экспериментальных и натурных исследований дается количественная оценка участия различных категорий почвенной влаги в процессах вертикального и горизонтального перемещения радионуклидов в почвенно-растительном покрове. Выявлено постоянство коэффициентов накопления и коэффициентов дискриминации ^{90}Sr и ^{137}Cs относительно их макроаналогов (соответственно Ca и K) при поступлении из почвы в растения в условиях разной влажности почв и температурного режима.

Впервые дается сравнительная оценка радиоактивного загрязнения почвенно-растительного покрова в зонах нормально функционирующих Белоярской атомной и Рефтинской тепловой электростанций на Урале; отмечается вклад слаборадиоактивных жидкых сбросов Белоярской АЭС в радиоактивное загрязнение близлежащей болотно-речной экосистемы и примыкающего к ней почвенно-растительного покрова.

Рассматриваются особенности миграции ^{90}Sr , ^{134}Cs и ^{137}Cs в почвенно-растительном покрове зоны аварии на Чернобыльской АЭС.

Практическая ценность работы. Результаты настоящей диссертации находят практическое применение при проведении рекультивации земель, временно изъятых из сферы сельского хозяйства в процессе добычи и переработки минерального сырья предприятиями начального ядерного топливного цикла, а также при разработке нормативных документов по использованию слаборадиоактивных минерализованных шахтных вод для полива сельскохозяйственных растений. Результаты проведенных исследований явились основой для разработки и внедрения в практику работы Белоярской атомной электростанции норм допустимых радиоактивных жидких сбросов в водоем-охладитель и в примыкающую болотно-речную экосистему; они используются для периодической оценки и улучшения радиоэкологической обстановки в зоне станции, при составлении прогноза воздействия очередного блока Белоярской АЭС на окружающую среду.

Фактический материал, представленный в диссертации и опубликованный в соответствующих работах, используется специалистами по охране природы для экологической экспертизы при выборе и проектировании новых площадок строительства промышленных АЭС. Основные материалы исследований по радиоэкологии почвенно-растительного по-

крова вошли в соответствующие разделы лекционного курса по радиоэкологии и основам радиобиологии, читаемого для студентов старших курсов Уральского государственного университета им.А.М.Горького.

Автор защищает: 1. Сформулированные основные задачи и результаты исследований, составляющие самостоятельное направление общей радиобиологии – радиоэкологию почвенно-растительного покрова. 2. Вскрытие закономерности поведения ряда искусственных и естественных радионуклидов в системах почва-раствор, почва-растение, почва-растительный покров естественных биогеоценозов под влиянием ряда экологических и физико-химических факторов. 3. Экологострохимические особенности миграции долгоживущих радионуклидов ^{90}Sr и ^{137}Cs при поступлении их в почвенно-растительный покров с глобальными радиоактивными выпадениями из атмосферы и в результате штатной эксплуатации атомной и тепловой электростанций на Урале, а также в условиях аварии на ЧАЭС.

Апробация работы. Главные положения и основные результаты диссертации докладывались на следующих международных, всесоюзных, региональных конференциях, совещаниях и семинарах: Всесоюзная конференция "Миграция радиоактивных продуктов деления в почвенно-растительном покрове" (Москва, 1964); Всесоюзный симпозиум "Изучение, рациональное использование и охрана воспроизводимых природных ресурсов Крайнего Севера" (Свердловск, 1970); IV Всесоюзный делегатский съезд почвоведов (Алма-Ата, 1970); Всесоюзный симпозиум "Иследование форм соединений радионуклидов и механизмы их миграций в почвах и растениях" (Тбилиси, 1970); I Международная радиобиологическая конференция "О теоретических и практических проблемах загрязнения окружающей среды радиоактивными веществами" (ЧССР; Старый Смоковец, 1972); Всесоюзный симпозиум "Теоретические и практические аспекты действия малых доз ионизирующей радиации" (Сыктывкар, 1973); Всесоюзная конференция "Лихеноиндикация состояния окружающей среды" (Таллин, 1978); II Радиобиологическая конференция социалистических стран (НРБ, 1978); I Всесоюзная конференция по сельскохозяйственной радиологии (Москва, 1979); Всесоюзная конференция "Радиационная безопасность населения и защита окружающей среды в связи с эксплуатацией атомных электростанций" (Димитровград, 1981); Всесоюзная конференция "Биогеохимический круговорот веществ" (Пущино, 1982); II Всесоюзная конференция по сельскохозяйственной радиологии (Обнинск, 1984); I Международный

семинар "Методы биомониторинга окружающей среды в районе атомных электростанций" (Сочи, 1984); Научная конференция "Сельскохозяйственная наука Урала - производству" (Свердловск, 1986); Всесоюзная конференция "Надежность биосистем и радиоэкология" (Мукачево, 1988); XVII Радиоэкологические чтения "Миграция основных радиоэкологически значимых нуклидов по сельскохозяйственным цепочкам" (Обнинск, 1988); I Всесоюзный радиобиологический съезд (Москва, 1989); I Всесоюзная конференция Ядерного общества СССР (Обнинск, 1990).

Публикации. По теме диссертации опубликовано 75 печатных работ, в том числе 2 монографии, одна из которых переведана на английском языке. Одна монография находится в печати.

Структура и объем работы. Диссертация состоит из введения, 6 глав, заключения и выводов. Работа изложена на 363 стр. машинописного текста, включая 41 рисунок и 79 таблиц. Библиография насчитывает 482 наименования, из них 127 зарубежных авторов.

СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении изложена актуальность проблемы, сформулированы цель и задачи исследования, отмечена научная новизна и практическая значимость диссертационной работы.

В главе I "ОБЪЕКТЫ И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ" детально описываются объекты исследования, которыми служили искусственные и естественные радионуклиды ^{59}Fe , ^{60}Co , ^{90}Sr , ^{91}Y , ^{137}Cs , ^{144}Ce , ^{226}Ra , ^{232}Th и ^{238}U , а в отдельных случаях нуклиды ^3H , ^{32}P , ^{45}Ca , ^{210}Pb и ^{210}Po ; образцы типичных зональных почв: дерново-луговой, среднесуглинистой, горизонт А (Южный Урал, Ильменский заповедник), дерново-подзолистой, легкосуглинистой, горизонты A_1 , A_2 , B_1 (Московская обл., с/х опытная станция "Немчиновка"), чернозема тяжелосуглинистого, горизонт А (Курская обл., Центрально-черноземный заповедник) и краснозема тяжелосуглинистого, горизонт A_1 (Грузинская ССР, Зугдиди); представители культурных растений и дикорастущих трав. Характеризуются участки естественных биогеоценозов и природных ландшафтов, выбранные для натурных исследований, участки естественного почвенно-растительного покрова, примыкающие к Белоярской атомной и Рефтинской тепловой электростанциям на Урале и 30-км зоны аварии на Чернобыльской АЭС. Излагаются используемые методы лабораторных, вегетационных и полевых опытов, а также методы сравнительно-географического изучения природных биогеоценозов.

зов и сопряженных по стоку участков ландшафта. Описываются радиометрические, спектрометрические и радиохимические методы определения содержания отдельных радионуклидов в образцах почв, растений и водных растворов. Методики определения стабильных изотопов химических элементов принятые в почвоведении и агрохимии.

Глава 2. ПОГЛОЩЕНИЕ И ПРОЧНОСТЬ ФИКСАЦИИ РАДИОНУКЛИДОВ В ПОЧВАХ

В этой главе рассматриваются результаты опытов по изучению влияния ряда факторов среды на подвижность радионуклидов в системе почва-раствор. Значительная часть этих опытов проведена с почвенными суспензиями при соотношении жидкой и твердой фаз (Коэффициент обводненности) равном 20. О подвижности радионуклидов в такой системе судили по энзите поглощения и прочности фиксации их в почвах из водных растворов.

Установлено, что скорость и полнота поглощения микроколичеств ^{59}Fe , ^{60}Co , ^{90}Sr , ^{91}Y , ^{137}Cs и ^{144}Ce , а также ^{226}Ra , ^{232}Th и ^{238}U в почве из водной среды определяется (при прочих равных условиях) химической природой перечисленных радионуклидов и мало зависит от свойств почвы. Это обусловлено тем, что емкость поглощения изучавшихся разновидностей почв достаточно велика для фиксации сорбционноспособных форм микроколичеств радионуклидов, находящихся в растворе. Изменение щелочно-кислотных условий среды не влияет на поглощение ^{60}Co , ^{90}Sr , ^{91}Y и ^{137}Cs почвами, тогда как поглощение ^{59}Fe и ^{144}Ce снижается в области нейтральных и щелочных значений pH, при которых железо и церий гидролизуются и переходят в коллоидные формы, плохо сорбируемые в почвах.

Опытами по изучению подвижности радионуклидов в широком диапазоне pH и концентраций (от 10^{-9} до 10^{-4} моль/л) изотопных носителей показано, что наиболее полное поглощение железа и церия почвами отмечается при их концентрации в растворе равной 10^{-4} моль/л, когда образующиеся коллоидные агрегаты механически задерживаются почвенными частицами. Со снижением концентрации на 1-2 порядка величин поглощение железа уменьшается при переходе от олабокислых к нейтральным значениям pH, а поглощение церия - в нейтральной и щелочной области. Кобальт и иттрий в изученном диапазоне концентраций практически полностью поглощаются почвами, несмотря на появление коллоидов в растворе при концентрациях

10^{-6} - 10^{-8} моль/л при pH 8-9. Независимость поглощения этих элементов от концентрации и щелочно-кислотных условий среды связана, вероятно, с образованием положительно заряженных, хорошо сорбируемых почвами, коллоидов. Для ^{90}Sr и ^{137}Cs при концентрации 10^{-2} моль/л отмечается область сорбционного насыщения, в которой их поглощение почвами резко снижается. Присутствие в растворе неизотопных носителей радионуклидов, железа и алюминия, снижает поглощение почвами ^{60}Co , ^{91}Y , ^{144}Ce . Это снижение связано с процессами соосаждения и адсорбции радионуклидов с коллоидами макроносителей и проявляется тем резче, чем выше концентрация стабильных носителей в исходном растворе. Снижение поглощения ^{90}Sr и ^{137}Cs определяется конкурентными взаимоотношениями с макроалментами - химическими аналогами соответственно Ca и K.

В форме внутрикомплексных соединений с искусственными комплексонами большинство радионуклидов слабо поглощается почвой, а эффективность комплексонов находится в прямой зависимости от прочности внутрикомплексных соединений, характеризующихся константами устойчивости. Водные экстракты из листьев древесных пород и наземной массы травяной растительности, а также лизиметрические воды и растворы, выделенные из лесных подстилок, также повышают подвижность в системе почва-раствор всех изучавшихся радионуклидов, за исключением ^{137}Cs . Такое действие растительных экстрактов, с одной стороны, объясняется наличием в них органических веществ, способных переводить соответствующие радионуклиды в устойчивые, растворимые в воде комплексные соединения, а с другой - повышенной концентрацией в них катионов (особенно макроалментов), способных вытеснить радионуклиды из почвы в раствор.

Наряду с этим подвижность радионуклидов в почвах в значительной степени зависит от уровня их обводненности. С повышением обводненности почвы общее содержание всех изучавшихся радионуклидов в жидкой фазе увеличивается (табл. I).

В результате, если судить о степени подвижности разных радионуклидов по их общему содержанию в жидкой фазе, то во влажной почве подвижность ^{90}Sr превышает таковую остальных радионуклидов в десятки и сотни раз. При переходе к почвенным суспензиям эти различия заметно сглаживаются. Этому в значительной степени способствуют выделяемые из почвы вещества органической и мине-

Таблица I

Содержание радионуклидов в растворе
в зависимости от степени обводненности почв,
% от внесенного в почву количества

Коэффициент обводненности почв	Дерново-луговая почва				Дерново-подзолистая почва		
	^{60}Co	^{90}Sr	^{137}Cs	^{144}Ce	^{90}Sr	^{137}Cs	^{144}Ce
0,1	0,13	0,42	0,01	0,01	1,23	0,02	0,02
0,2	0,16	0,54	0,01	0,01	0,81	0,03	0,03
0,3	0,12	0,31	0,02	0,01	0,92	0,04	0,06
0,5	0,12	0,23	0,13	0,04	1,41	0,18	0,18
1,0	0,24	0,40	0,43	0,10	2,10	0,38	0,30
2,0	0,44	0,64	0,91	0,22	4,13	1,20	1,10
5,0	0,63	1,12	1,25	0,28	7,12	1,50	1,55
10,0	0,85	1,70	1,25	0,45	11,10	2,50	2,08
20,0	1,20	1,43	1,37	0,40	11,40	3,00	1,88

ральной природы, а также воднорастворимые соединения, образующиеся в процессе разложения растительного опада. Водная миграция естественных радионуклидов (^{238}U и ^{232}Th) весьма незначительна.

Результаты разнообразных опытов по десорбции радионуклидов позволяют утверждать, что прочность их закрепления зависит как от свойств отдельных радионуклидов, так и от физико-химических особенностей почв. Из числа искусственных радионуклидов наиболее прочно во всех исследованных почвах фиксируется ^{59}Fe и ^{137}Cs , остальные по прочности их фиксации можно расположить в ряду:

$^{91}\text{Y} > ^{144}\text{Ce} > ^{60}\text{Co} > ^{90}\text{Sr}$. Из естественных нуклидов наименее прочно связывается ^{226}Ra , а затем идут ^{238}U и ^{232}Th . Прочность закрепления радионуклидов в почвах в широком диапазоне концентраций остается постоянной; она не зависит также от величины pH и температуры десорбирующего раствора. Почвы по прочности фиксации в них радионуклидов изменяются в ряду: дерново-луговая > чернозем > краснозем > дерново-подзолистая. Поскольку эти почвы, примерно, в той же последовательности отличаются друг от друга по содержанию в них гумуса и илистой фракции, предполагается, что органическое вещество и илестые частицы способны снижать подвижность радионуклидов. Специальные опыты с липкими органического вещества почвами подтвердили, что прочность фиксации в них радио-

нуклидов значительно ниже, чем в нативных почвах. В последних ^{60}Ce , ^{90}Sr и ^{226}Ra находятся преимущественно в ионно-обменном и кислотно-растворимом состоянии, а ^{59}Fe , ^{91}Y , ^{137}Cs , ^{232}Th и ^{238}U - в виде прочнофиксированных соединений. Увеличение времени взаимодействия с почвой как искусственных, так и естественных радионуклидов приводит к снижению их подвижности в системе почва-раствор за счет дополнительного перехода радионуклидов из подвижных в прочнозакрепленные формы - эффект "старения".

Среди различных катионов, применявшихся в экспериментах в качестве десорбентов, для некоторых радионуклидов выделены так называемые специфические вытеснители. Для ^{59}Fe таким вытеснителем является алюминий, для ^{91}Y - медь и железо, для ^{144}Ce - железо. В отношении ^{60}Co и ^{90}Sr , фиксирующихся преимущественно по ионно-обменному типу, десорбирующее действие катионов увеличивается с возрастанием их атомного веса и валентности. Сильное десорбирующее действие специфических вытеснителей объясняется тем, что в почве они вступают преимущественно в такие же соединения, как и вытесняемые ими радионуклиды. Следовательно, катионы - специфические вытеснители можно рассматривать в качестве неизотопных носителей соответствующих радионуклидов. Для ^{238}U наиболее эффективным десорбентом оказался раствор Na_2CO_3 , под влиянием которого происходит высвобождение этого нуклида из органоминеральных комплексов и глинистых минералов почв.

Глава 3. ВЕРТИКАЛЬНАЯ МИГРАЦИЯ РАДИОНУКЛИДОВ В ПОЧВАХ

Вертикальная миграция радионуклидов в почве складывается, по крайней мере, из двух этапов: а) перехода их в жидкую фазу и б) перемещения с растворами по почвенному профилю. Процессы вертикального перемещения радионуклидов изучали в динамических условиях опыта. В таких опытах образцы почв, с предварительно загрязненными радионуклидами верхними слоями, помешали в металлические колонки. В основании колонок имелись зажимы, позволяющие регулировать условия почвенного увлажнения.

Опыты с почвенными колонками подтвердили повышенную миграционную способность ^{90}Sr по сравнению с ^{137}Cs и ^{144}Ce в условиях различной обводненности почв. При этом с повышением почвенного увлажнения вертикальная миграция ^{90}Sr возрастает, а ^{137}Cs и ^{144}Ce не изменяется. Распределение радионуклидов в почвенном растворе хорошо коррелирует с их распределением в почве. Так, при

малом режиме увлажнения (коэффициент обводненности - 0,2) радиостронций, перешедший в почвенный раствор, в основном удерживается в слое первоначального внесения, что связано с отсутствием перемещения гравитационной влаги. При затоплении почвы и фильтрации через нее воды имеет место разбавление почвенного раствора и перемещение ^{90}Sr в более глубокие слои почвы. Основное количество воднорасторимых форм ^{137}Cs и ^{144}Ce при всех уровнях обводненности почв удерживается в слое первоначального внесения и не передвигается с потоком гравитационной воды вниз по профилю.

В серии специальных опытов с использованием ^3H , ^{90}Sr и ^{137}Cs , а также естественных радионуклидов ^{232}Th и ^{238}U оценена роль различных категорий почвенной влаги, отличающихся прочностью связи с твердой фазой, в вертикальном перемещении перечисленных радионуклидов. Анализ распределения ^3H между различными категориями влаги выявил минимальное его содержание в прочносвязанной кристаллизационной воде, а максимальное - в капиллярно-сорбционной и гравитационной. Основное количество воднорасторимого ^{90}Sr также переходит в свободнофильтрующуюся гравитационную воду, в то время как большая часть ^{137}Cs удерживается в менее подвижных капиллярно-сорбционных формах почвенной влаги (табл.2), чем и объясняется его малая подвижность в профиле почвенных колонок.

Таблица 2

Распределение радионуклидов между гравитационной (1) и капиллярно-сорбционной (2) влагой, % от суммарного содержания в жидкой фазе

Почва	Коэффициент обводненности	^{90}Sr		^{137}Cs	
		1	2	1	2
Дерново-подзолистая, гор. А ₂	0,3	9,2	90,8	1,0	99,0
	1,0	84,5	15,5	2,0	93,0
Дерново-луговая, гор. А	0,3	5,0	95,0	1,0	99,0
	1,0	76,4	23,6	9,5	90,5

Различия в вертикальной миграции между ^{90}Sr и ^{137}Cs сохраняются и в опытах с почвенными колонками, с внесением на поверх-

II

ность почвы измельченной хвои сосны, листьев осины и березы. Эти же различия отмечены и на участках естественных лесных биогеоценозов под влиянием разлагалщегося растительного опада.

Как и в статической системе почва-раствор, в этих опытах растительный опад не оказывал мобилизующего действия на ^{137}Cs и увеличивал миграцию ^{90}Sr . Наибольшее мобилизующее действие отмечено для ^{59}Fe . В вариантах без растительного опада вертикальная миграция этого радионуклида при разных режимах почвенного увлажнения была весьма незначительной, а в условиях анаэробного разложения листьев осины вынос ^{59}Fe из слоя первичного загрязнения составил более 50% от исходного его содержания. С помощью центрифугирования установлено, что ^{59}Fe мигрирует в профиле почвенных колонок в виде тонкодисперсных коллоидных частиц, высокая подвижность которых была отмечена при изучении системы почва-раствор.

В условиях динамических опытов, как и в статических опытах, водная миграция представителей группы тяжелых естественных радионуклидов невелика: ^{232}Th практически не переходит в жидкую фазу почв, а содержание в почвенном растворе ^{238}U не превышает тысячных долей процента от общего его количества в почве.

Глава 4. ПОСТУПЛЕНИЕ РАДИОНУКЛИДОВ ИЗ ПОЧВЫ В РАСТЕНИЯ

В этой главе дан сравнительный анализ поведения радионуклидов в системе почва-растение в зависимости от ряда сопутствующих факторов. Проведенные исследования показали, что данные вегетационных опытов достаточно хорошо согласуются с результатами, полученными при изучении подвижности радионуклидов в системе почва-раствор. Так, из дерново-луговой почвы радионуклиды поглощаются растениями в меньшем количестве, чем из дерново-подзолистой, поскольку в первой они фиксируются более прочно, чем во второй. Относительно высокой подвижности ^{59}Fe , обусловленной наличием плохосорбирующихся коллоидных форм, и ^{90}Sr , связанной с относительно слабой фиксацией его в почве, соответствует более высокое, по сравнению с другими радионуклидами, поступление в растения. Такое соответствие данных лабораторных и вегетационных опытов дает основание считать, что поступление радионуклидов из почвы в растения, в значительной степени, зависит от их подвижности в исходной системе почва-раствор. Эта подвижность, в свою очередь, определяется химической природой радионуклидов, формой,

в которой они находятся в почвенном растворе, а также свойствами почв. В некоторой степени поступление радионуклидов в растения зависит и от биологических особенностей растительного организма.

В серии вегетационных опытов показано, что, с повышением увлажненности почв от уровня влажности завядания до полной влагоемкости, общий вынос радионуклидов растениями увеличивается. Однако, это увеличение обусловлено лишь возрастанием биомассы растений на более увлажненной почве, а не изменением концентрации радионуклидов в растениях. Концентрация, а следовательно, и величины коэффициентов накопления радионуклидов остаются практически одинаковыми при всех изучавшихся режимах почвенного увлажнения (табл.3). В соответствии с этим и коэффициенты дискриминации ^{90}Sr относительно его макроаналога Са, а также ^{137}Cs относительно К при поступлении их из почвы в растения не зависят от уровня увлажненности почвы. В этом случае также проявилось соответствие между результатами лабораторных и вегетационных опытов. При рассмотрении системы почва-растvor отмечено, что во влажных почвах (коэффициенты обводненности от 0,1 до 0,3) концентрация ^{137}Cs и ^{144}Ce в жидкой фазе существенно не изменяется. Видимо, этим и объясняется стабильность коэффициентов накопления радионуклидов при указанных уровнях почвенного увлажнения. Вместе с тем, концентрация ^{90}Sr в жидкой фазе изменяется в обратной зависимости от режима почвенного увлажнения, что, казалось бы, должно отразиться на поступлении этого нуклида в растения. Отсутствие зависимости между концентрацией ^{90}Sr в растениях и степенью почвенного увлажнения может указывать на дополнительный (наряду с почвенным раствором) источник его поступления в растительный организм. Результаты специального опыта, в котором изучали накопление ^{90}Sr горохом и ячменем в зависимости от влажности почв с учетом изменений концентрации радионуклида в почвенном растворе показали, что таким источником служит сама почва, в которой ^{90}Sr фиксируется менееочно прочно по сравнению с другими радионуклидами. В целом аналогичные данные получены и для ^{226}Ra , относящегося по своим физико-химическим свойствам, подобно ^{90}Sr , к группе щелочно-земельных элементов. Характер распределения излучателей между надземной и подземной частями растений определяется в основном лишь свойствами радионуклидов и не зависит от влажности почв и видовых особенностей изучавшихся растений. На примере

Таблица 3

Коэффициенты закопчения радионуклидов в надземной массе
растений в зависимости от влажности дерново-луговой почвы

Коэффициент обедненности изотопами	^{59}Fe	^{60}Co	^{90}Sr	^{91}Y	^{137}Cs	^{144}Ce	^{226}Ra
	Горох						
0,1	0,86±0,04	0,27±0,01	9,15±0,43	0,16±0,04	1,05±0,03	0,08±0,01	0,08±0,01
0,2	0,81±0,06	0,30±0,03	10,80±0,28	0,16±0,02	1,31±0,09	0,08±0,01	0,09±0,01
0,3	0,81±0,02	0,28±0,01	9,90±0,10	0,19±0,02	1,06±0,01	0,07±0,01	0,10±0,01
Ячмень							
0,1	0,52±0,03	0,04±0,01	1,65±0,10	-	0,26±0,02	0,05±0,01	0,08±0,01
0,2	0,33±0,05	0,13±0,02	1,40±0,04	0,05±0,02	0,24±0,01	0,24±0,01	0,09±0,01
0,3	0,55±0,05	0,06±0,01	1,65±0,06	0,03±0,01	0,17±0,02	0,04±0,01	0,05±0,01

долгоживущих, осколочных радионуклидов показано, что ^{90}Sr преимущественно (80–95%) накапливается в надземной массе растений, ^{137}Cs распределяется более или менее равномерно, а ^{144}Ce в основном содержится в корневой системе.

Отмечено некоторое возрастание поступления ^{59}Fe в растения с повышением температуры поливной воды от 2 до 50°C, а также более высокая миграционная способность в системе почва–растение внесенных в почву изотопов ^{45}Ca и ^{32}P по сравнению с природными стабильными изотопами кальция и фосфора.

Радионуклиды ^{59}Fe , ^{60}Co , ^{91}Y , поступившие в почву в виде комплексных соединений с ЭДТА, накапливаются растениями в значительно большем количестве, чем при внесении в виде простых солей. В этом случае также наблюдается хорошее соответствие между результатами лабораторных и вегетационных опытов. В лабораторных опытах комплексон, снижая сорбцию радионуклидов в почве, увеличивает их подвижность в системе почва–раствор, в вегетационных опытах этот механизм приводит к увеличению поступления радионуклидов в растения. На подвижность ^{90}Sr , ^{137}Cs и ^{144}Ce ЭДТА не оказывает существенного влияния; поскольку комплексные соединения этих нуклидов в почве недостаточно устойчивы к процессам химического и биологического разрушения. С увеличением избытка концентраций ЭДТА в среде накопление ^{60}Co растениями снижается. Такое снижение связано с образованием при избытке комплексона соединений с другими катионами, которые вступают в конкурентные отношения при поступлении из внешней среды в растения. Отмечено, что особенность необходимо учитывать при использовании комплексных соединений в качестве микроудобрений, так как избыток комплексона по отношению к микроэлементу в исходном препарате снижает эффективность микроудобрения.

В опытах с шахтными водами, содержащими повышенные концентрации естественных радионуклидов, показано, что накопление этих нуклидов в растениях существенно зависит от характера их поступления в почву и способа полива растений. При поливе радионуклиды поступают в растения как непосредственно из поливной воды, так и из почвы. Опытами по изучению накопления ^{226}Ra показано, что его доступность растениям из поливной воды гораздо выше, чем из почвы. При поливе дождеванием в надземных частях растений удерживается в 2–10 раз больше радионуклидов, чем при поливе напуском.

В целом при поливе шахтной водой растениями выносится на дневную поверхность 0,5–1,5% естественных радионуклидов от общего их количества в почве. В этом случае содержание нуклидов в лизиметрических водах на I–III порядка величин ниже, чем в растениях. Такое содержание радионуклидов в лизиметрических водах находится в соответствии с их незначительной водной миграцией, отмеченной ранее. Основное количество естественных радионуклидов, а также ионов Na^+ , Cl^- , SO_4^{2-} , поступающих с поливной шахтной водой, задерживается в почве, что может со временем привести к радиоактивному загрязнению почвенно-растительного покрова и ухудшению водно-физических свойств почвы за счет накопления в ней ионов загрязнителей.

Внесение в почву фосфорных удобрений снижает поступление в растения ^{238}U , а также почвенных фосфатов, что особенно отчетливо проявляется на обедненной фосфором дерново-подзолистой почве. В связи с этим в работе рассматриваются различные способы снижения поступления радионуклидов в растения с тем, чтобы обеспечить на радиоактивно-загрязненных почвах получение сельскохозяйственной продукции с минимальным содержанием радионуклидов.

Глава 5. МИГРАЦИЯ И РАСПРЕДЕЛЕНИЕ РАДИОНУКЛИДОВ В ПОЧВЕННО-РАСТИТЕЛЬНОМ ПОКРОВЕ ЕСТЕСТВЕННЫХ БИОГЕОЦЕНОЗОВ

Изложенные в предыдущих главах результаты лабораторных и вегетационных опытов подтверждают, что факторы, определяющие степень подвижности радионуклидов в относительно простой системе почва-раствор, в значительной степени влияют на их подвижность в более сложной системе почва-растение.

В настоящей главе для сравнения приводятся результаты исследований миграции и распределения радионуклидов в еще более сложной системе почва-растительный покров естественных биогеоценозов. При проведении таких исследований в одних случаях радионуклиды вносили искусственно в поверхностные слои почвы небольших участков биогеоценозов, после чего прослеживали их миграцию и распределение в почвенно-растительном покрове. В других случаях анализировали естественные участки биогеоценозов и определенные по стоку участки ландшафтов, загрязненные радионуклидами в процессе глобальных выпадений из атмосферы, а также в результате работы атомной и тепловой электростанций.

Показано, что при искусственном загрязнении радионуклидами лесной подстилки хвойного и лиственного леса, надземная масса травяной растительности в естественных условиях выносит на дневную поверхность десятие и сотые доли процента от внесенного количества радионуклидов. Содержание их в корнях на один-два порядка величин больше. Существенным компонентом биогеоценоза, задерживающим в себе радионуклиды, является лесная подстилка. Причем, в большинстве случаев, в подстилке лиственного леса, характеризующейся большей массой и большей сорбционной емкостью, содержание радионуклидов выше, чем в подстилке хвойного леса. Основное количество радионуклидов сосредоточено в верхнем (0-5 см) слое почвы, из которого они в той или иной степени мигрируют в более глубокие слои. Следует подчеркнуть, что результаты этой серии опытов тоже достаточно хорошо согласуются с результатами лабораторных и вегетационных опытов. В естественных условиях наиболее подвижными проявили себя ^{59}Fe и ^{144}Ce . Это обусловлено физико-химическим состоянием указанных радионуклидов в почвенном растворе, поскольку при pH 6-8, характерных для исследуемых почв, микроколичества железа и церия переходят в коллоидные формы плохо сорбируемые почвой. Исследования, проведенные на сопряженных по стоку естественных участках горно-лесного ландшафта Южного Урала и на участках тундрового ландшафта Крайнего Севера, показали, что при прочих равных условиях, ^{90}Sr обладает более высокой миграционной способностью по сравнению с ^{137}Cs как непосредственно в почвенно-растительном покрове, так и в ландшафте в целом. При этом на всех экспериментальных участках Южного Урала, характеризующихся неустойчивым режимом почвенного увлажнения, распределение ^{90}Sr и ^{137}Cs в почвах подчиняется экспоненциальной зависимости. На естественных участках тундрового ландшафта вертикальное распределение ^{90}Sr в почве удовлетворительно описывается линейной зависимостью. Линейный характер зависимости указывает на то, что в условиях тундры, при постоянном избыточном увлажнении почвенно-растительного покрова, заметную роль в миграции радионуклида приобретает конвективный перенос с внутрипочвенным стоком.

Большая подвижность ^{90}Sr по сравнению с ^{137}Cs выявлена при изучении миграции и распределения указанных радионуклидов в почвенно-растительном покрове и по элементам ландшафта, по-

ступивших туда с глобальными радиоактивными выпадениями из атмосферы и в результате эксплуатации атомной электростанции. В период интенсивных глобальных выпадений концентрации радионуклидов в растительном покрове и почвах эловиальных и аккумулятивных участков тундрового ландшафта оказались практически одинаковыми. При этом максимальная концентрация ^{90}Sr и ^{137}Cs отмечалась в травяном и мохово-травяном покрове. В подстилке и почвенных горизонтах она снижалась на порядок ^{90}Sr . В период стабилизации радиоактивных выпадений из атмосферы ^{90}Sr более или менее равномерно распределился между растительным покровом, лесной подстилкой и почвенными слоями, а распределение ^{137}Cs в почве характеризовалось наличием слоя с максимальной концентрацией в нем радионуклида. Этот слой, расположенный непосредственно под лесной подстилкой, представляющий наиболее гумусированную часть аккумулятивного горизонта, может рассматриваться в качестве индикатора радиоактивного загрязнения почв. Мхи и лишайники, в силу своих морфофункциональных особенностей, также обладают способностью к повышенному накоплению радионуклидов. Проведенный сравнительный анализ содержания ^{90}Sr и ^{137}Cs в сфагновом мхе верхового болота и некоторых видах наземных растений, произрастающих в непосредственной близости от этого болота, показал, что концентрация радионуклидов во мхах в 2-20 раз выше, чем в представителях высших растений. При этом отмечается, что в природных условиях мхи накапливают радионуклиды преимущественно из атмосферных осадков и водных растворов, формирующихся в местах их произрастания и, как правило, удерживают в себе больше ^{137}Cs , чем ^{90}Sr . Экспериментальные данные по накоплению и выделению радионуклидов из растений некоторых видов мхов дают основание считать, что одной из причин повышенного накопления ^{137}Cs моховой растительностью в естественных условиях является более прочная фиксация его в тканях растений по сравнению со ^{90}Sr .

Радиоэкологические исследования природных экосистем в районе Белоярской атомной электростанции им. И.В.Курчатова на Урале не выявили существенного вклада газоаэрозольных выбросов станции в загрязнение ^{90}Sr и ^{137}Cs окружающей среды. Содержание радионуклидов в почвах на разных расстояниях от АЭС оказалось практически одинаковым (табл.4), а у изученных представителей цветковых и споровых растений не превышало уровней, отмеченных для других регионов страны.

Таблица 4

Содержание радионуклидов в 10-см слое почв
на разных расстояниях от АЭС, Бк/кг

Радионуклид	Расстояние от АЭС, км				Дисперсионный анализ	
	1	5	10	400	$F_{0,05} = 3,1$	$t^2 x, \%$
^{90}Sr	25 ± 7	28 ± 4	20 ± 6	30 ± 9	3,0	4,1
^{137}Cs	156 ± 43	142 ± 23	80 ± 35	137 ± 39	2,6	28,9
$^{90}\text{Sr}/^{137}\text{Cs}$	0,16	0,20	0,25	0,22		

Иная картина складывается в районе Ольховской болотно-речной экосистемы, куда длительное время ведется сброс слаборадиоактивных дебалансных вод Белоярской АЭС. Такой сброс привел к повышению содержания радионуклидов в воде и накоплению их в донных отложениях болота. Основным загрязнителем болотно-речной экосистемы является ^{137}Cs , а за ним в порядке убывания следуют ^{60}Co и ^{90}Sr . Так, в верхнем слое песчаных отложений Ольховской болотно-речной экосистемы содержание ^{90}Sr составляет десятки, а в илистых отложениях - сотни Бк/кг. Содержание в них ^{60}Co в среднем в 30, а ^{137}Cs - в 300 раз выше.

Поскольку исследуемая экосистема характеризуется повышенным содержанием радионуклидов, особенно ^{137}Cs , была оценена ее роль в загрязнении примыкающего почвенно-растительного покрова. Анализ содержания радионуклидов в почвах, непосредственно граничащих с болотом и удаленных от него на расстояние до 500 м, показал, что прибрежные болотистые образования служат своеобразным природным экраном на пути миграции радионуклидов к береговой зоне и к окружающему болото почвенно-растительному покрову. В результате этого на прибрежных участках дополнительно задерживается ^{137}Cs поступающий на поверхность почв в периоды весеннего их затопления (табл.5).

В соответствии с повышенным содержанием ^{137}Cs в почвах, примыкающих к Ольховскому болоту, отмечается и относительно высокая его концентрация в растениях, произрастающих на этих участках. Однако, при меньшей концентрации ^{90}Sr в почвах и растениях, коэффициенты накопления этого нуклида оказываются в 1,5-5 раз выше, чем коэффициенты накопления ^{137}Cs , что связано с различной прочностью их закрепления в почвах.

Таблица 5
Концентрация радионуклидов в почвах, примыкающих
к Ольховскому болоту, Бк/кг

Почва	Горизонт, глубина, см	^{90}Sr	^{137}Cs	$^{90}\text{Sr}/^{137}\text{Cs}$
Бурая, лесная, оторвованная, оглеенная (берег болота)	A ₀ 0- I	40±10	5110±185	0,01
	A _T I- 6	28± 5	3440±180	0,01
	AB 6-10	13± 4	280± 30	0,05
Бурая лесная, (500 м от бе- рега болота)	A ₀ 0- I	51± 5	200± 30	0,25
	A I- 5	29± 4	215± 67	0,14
	AB 5-10	6± 3	26± II	0,27

Для характеристики прочности закрепления радионуклидов в исследуемых почвах изучали содержание и распределение по глубине почвенных профилей воднорастворимых, обменных, кислотнорастворимых и фиксированных форм ^{90}Sr и ^{137}Cs . Статистическая обработка полученных данных не выявила достоверных различий в распределении всех форм ^{90}Sr по глубине почвенных профилей. В почвах торфянистых отложениях Ольховского болота этот радионуклид находится преимущественно в обменной форме. В то же время значительная часть ^{137}Cs (59-84%) прочно фиксируется в верхних горизонтах почв. С увеличением глубины доля фиксированного ^{137}Cs закономерно снижается, а воднорастворимого и кислотнорастворимого возрастает. Вследствие этого вертикальная миграция радиоцезия в почвах сопровождается дифференциацией его форм с глубиной, приводящей к обогащению нижележащих слоев подвижным цезием.

В целом на расстоянии свыше 300-500 м от берега болота содержание радионуклидов в почвенно-растительном покрове не превышает фонового уровня. Это подтвердили и специальные исследования содержания долгоживущих радионуклидов в доминирующих видах травянистых растений, съедобных грибов, а также во мхах и лишайниках, произрастающих в окрестностях АЭС (Нифонтова, Куликов, 1981; 1984).

В зоне Рефтинской ТЭС не выявлено сколько-нибудь заметного вклада станции в радиоактивное загрязнение почвенно-растительного покрова тяжелыми естественными радионуклидами и долгоживущими продуктами деления урана. Концентрации естественных радионуклидов в

верхнем 10-см слое почв, наиболее подверженном воздействию зольных выбросов, практически не отличаются от кларковых значений, а концентрации ^{90}Sr и ^{137}Cs находятся в пределах фоновых уровней (табл. 6).

Таблица 6

Содержание радионуклидов в 10-см слое почв на разных расстояниях от ТЭС

Расстояние от ТЭС, км	Бк/кг					$\mu \cdot 10^{-3}$ г/кг	
	^{90}Sr	^{137}Cs	^{210}Po	^{210}Pb	^{226}Ra	^{232}Th	^{238}U
1	29 ± 6	176 ± 110	139 ± 21	299 ± 31	28 ± 7	$3,9 \pm 0,7$	$0,3 \pm 0,03$
3	24 ± 8	130 ± 53	153 ± 59	134 ± 54	32 ± 8	$4,9 \pm 0,7$	$0,4 \pm 0,26$
4	21 ± 4	159 ± 47	116 ± 51	282 ± 96	20 ± 5	$2,9 \pm 0,8$	$0,2 \pm 0,07$
10	34 ± 8	92 ± 43	-	-	17 ± 4	$2,4 \pm 0,5$	$0,3 \pm 0,09$

Статистическая обработка материала с помощью дисперсионного анализа также подтвердила отсутствие достоверных различий в содержании радионуклидов в почвах этого региона: $F = 0,05$ табл. для разных нуклидов составляет значения 3,6-5,1, тогда как $F_{\text{факт.}}$ изменяется в пределах от 0,3 до 3,3.

Вместе с тем гидролоотвалы тепловой станции, характеризующиеся повышенным содержанием естественных радионуклидов, могут рассматриваться в качестве потенциального источника дополнительного их поступления в окружающую среду.

Радиоэкологические исследования в сопряженных со стоку участках ландшафта, расположенных на разных расстояниях от агрегатного блока в пределах 30-км зоны Чернобыльской АЭС, показали, что изучавшиеся радионуклиды в порядке уменьшения их содержания в почвенно-растительном покрове можно расположить в ряду: $^{137}\text{Cs} > ^{134}\text{Cs} > ^{90}\text{Sr}$ при более высокой плотности загрязнения на участках, расположенных в непосредственной близости от промплощадки станции. Так плотность загрязнения радионуклидами верхнего 0-2 см слоя почвы составляла сотни кБк/м² по ^{90}Sr и ^{134}Cs и тысячи кБк/м² по ^{137}Cs . На участках, удаленных от АЭС на расстояние 18 км, плотность загрязнения радионуклидами снижалась примерно на порядок величин (рис. I). При этом максимальные содержания радионуклидов приурочены к верхнему 0-2 см слою почвы на открытых участках и к слою лесной подстилки - в лесных насаждениях. Среди изу-

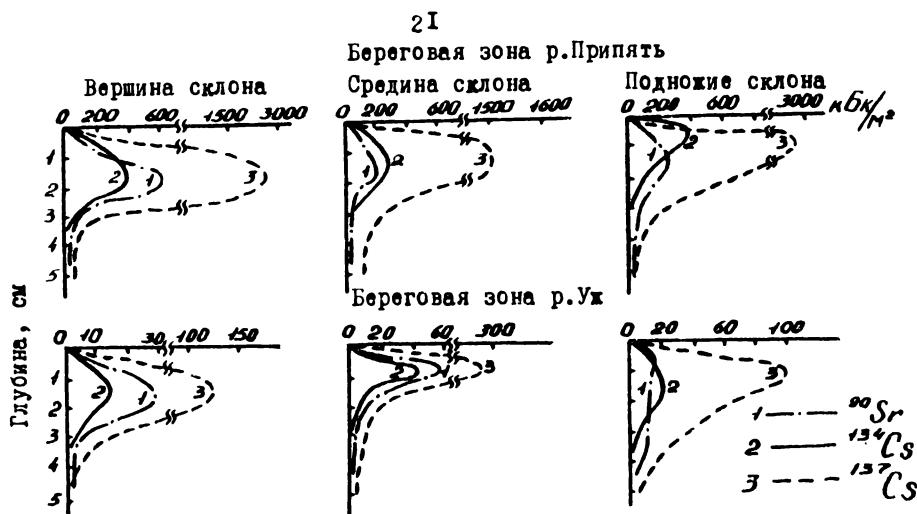


Рис. I. Плотность загрязнения радионуклидами почвенно-растительного покрова
аварийной зоны ЧАЭС

чавшихся видов дикорастущих растений наибольшей накопительной способностью обладают мхи, концентрация нуклидов в которых в 5-10 раз превышала таковую по сравнению с представителями других видов растений. В связи с малым промежутком времени, прошедшем после аварии, пространственная дифференциация содержания радионуклидов по отдельным компонентам рельефа пока не нашла четкого отражения.

Вовлечение радионуклидов в биогеохимические циклы миграции в послескорбийный период определяется, наряду с общим содержанием и разделением в почве, способностью их включаться в различные по подвижности формы соединений. Поскольку аварийные выбросы ЧАЭС характеризуются широким спектром физико-химических свойств, были изучены формы соединений ⁹⁰Sr и ¹³⁷Cs в почвах на разных расстояниях от АЭС. В непосредственной близости от станции ⁹⁰Sr находится преимущественно в фиксированном состоянии (до 74%), а по мере удаления от места аварии значительная часть его переходит в ионно-обменные формы. В почвах обследованных участков ¹³⁷Cs находится преимущественно в фиксированной и кислотно-растворимой формах, доля которых составляет около 80% от валового содержания (табл. 7).

Таблица 7
Распределение физико-химических форм ^{90}Sr и
 ^{137}Cs в почвах, %

Расстояние от ЧАЭС, км	Физико-химические формы радионуклидов			
	Воднорастворимая	Обменная	Кислотнорастворимая	Фиксированная
		Стронций-90		
3	0,6±0,3	17,7±2,9	7,7±2,1	74,1±1,7
6	1,0±0,5	64,4±7,0	21,7±2,0	13,0±5,4
18	1,8±0,4	48,4±1,2	11,7±1,0	38,2±2,6
		Цезий-137		
3	3,1±0,4	6,6±0,9	13,1±1,6	77,2±1,7
6	3,6±1,0	8,6±2,0	13,3±0,1	74,7±1,4
18	1,5±1,2	8,3±3,0	8,5±1,7	81,8±2,6

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Все возрастающее воздействие человека на окружающую природную среду и обострение противоречий между развивающейся промышленностью и биологическими продуктивными силами Земли ставит перед современной биологией проблемы исключительной важности. Одна из них – непрерывное повышение фона ионизирующей радиации биосфера за счет поступления в нее естественных и искусственных радионуклидов, высвобождающихся в результате развития атомной промышленности, энергетики и испытаний ядерного оружия. Поэтому радиоэкология, основной задачей которой, в конечном итоге, является обеспечение радиационной безопасности биосфера, включая самого человека, становится важнейшим звеном в ряду научных направлений, способствующих прогрессу атомной науки и техники. При этом общепланетарная роль почвенно-растительного покрова, его высокая управляемость и ранимость придают особое значение новой области науки – радиоэкологии почвенно-растительного покрова.

Основная задача этого направления исследований сводится к всестороннему изучению процессов миграции радионуклидов в почвенно-растительном покрове – главном компоненте наземных экосистем. Она включает в себя как экспериментальные работы по изучению миграции и распределения радионуклидов в основных радиоэкологических звеньях почва-раствор, почва-растение, почва-растительный покров ес-

тественных биогеоценозов, так и натурные исследования поведения радионуклидов в природных условиях, при поступлении их в почвенно-растительный покров с глобальными радиоактивными выпадениями из атмосферы, в результате штатной эксплуатации атомных и тепловых электростанций, а также в случае аварийных ситуаций.

В серии лабораторных опытов исследовали влияние ряда физико-химических факторов на подвижность радионуклидов в системе почва-раствор. Результаты проведенных исследований показали, что полнота поглощения радионуклидов почвами практически не зависит от свойств последних и определяется химической индивидуальностью самих нуклидов. Изменение щелочно-кислотных условий среды не влияет на поглощение ^{60}Co , ^{90}Sr , ^{91}Y и ^{137}Cs почвами, тогда как поглощени ^{59}Fe и ^{144}Ce снижается в области нейтральных и щелочных значений рН. Присутствие в растворе изотопных и неизотопных носителей радионуклидов, искусственных комплексонов, водных экстрактов из листьев древесных пород и наземной массы травянистых растений увеличивают подвижность радионуклидов в системе почва-раствор. Наряду с этим подвижность нуклидов в значительной степени зависит и от уровня обводненности почв. Как правило, общее их содержание в жидкой фазе увеличивается с повышением уровня почвенного увлажнения. При этом во влажной почве подвижность ^{90}Sr превышает таковую остальных радионуклидов на порядки величин. В почвенных суспензиях эти различия заметно сглаживаются. Наиболее прочно во всех исследованных почвах закрепляются ^{59}Fe , ^{91}Y , ^{137}Cs , ^{144}Ce , ^{232}Th и ^{238}U , а наименее прочно - ^{60}Co , ^{90}Sr , ^{226}Ra , для которых в значительной степени характерны реакции монного обмена.

Вертикальная миграция ^{59}Fe , ^{137}Cs , ^{144}Ce и ^{232}Th не зависит от уровня обводненности почв, в то время как миграция ^{90}Sr и ^{238}U в почвах возрастает с повышением их обводненности. Для трития выявлена дискриминация относительно протия при включении этих изотопов в прочно связанные формы влаги. Наличие на поверхности почвы слоя разлагающегося растительного опада способствует увеличению вертикальной миграции ^{59}Fe и ^{90}Sr , но не оказывает мобилизующего действия на ^{137}Cs .

Данные вегетационных опытов в общем достаточно хорошо согласуются с основными результатами, полученными при изучении подвижности радионуклидов в упрощенной системе почва-раствор. Так боль-

шей их подвижности в системе почва-раствор, обусловленной относительно слабой фиксацией в почвах, соответствует более высокое поступление радионуклидов из почвы в растения. Такое соответствие данных лабораторных и вегетационных опытов дает основание считать, что поступление радионуклидов из почвы в растения в значительной мере зависит от степени их подвижности в более простой системе почва-раствор. Последняя же, в свою очередь, определяется химической природой радионуклидов, формой, в которой они находятся в почвенном растворе, свойствами почвы. Поступление радионуклидов в растения зависит также и от их биологических особенностей. Результаты исследований миграции и распределения радионуклидов в системе почва-растительный покров естественных биогеоценозов также достаточно хорошо согласуется с результатами лабораторных и вегетационных опытов. В естественных условиях наиболее подвижными в почве проявили себя ^{59}Fe и ^{144}Ce . Это обусловлено физико-химическим состоянием указанных радионуклидов в почвенном растворе, поскольку лабораторными опытами в системе почва-раствор показано, что при pH 6-8 характерных для исследуемых почв, радионуклиды железа и церия переходят преимущественно в коллоидные формы, плохо сорбируемые почвой. В опытах на сопряженных по стоку естественных участках горно-лесного ландшафта Южного Урала и на участках тундрового ландшафта Крайнего Севера показано, что при прочих равных условиях ^{90}Sr обладает более высокой миграционной способностью по сравнению с ^{137}Cs как непосредственно в почвенно-растительном покрове, так и в ландшафте в целом. Об этом же свидетельствуют результаты сравнительного изучения миграции и распределения указанных радионуклидов в почвенно-растительном покрове и по элементам ландшафта, поступивших туда с глобальными радиоактивными выпадениями и в результате эксплуатаии атомной электростанции. При этом отмечается, что в таких условиях моховая растительность накапливает и удерживает в себе больше ^{137}Cs , чем ^{90}Sr , поскольку радиоактивный цезий прочнее удерживается в тканях растений, чем стронций.

В зоне Белоярской АЭС радиоактивное загрязнение окружающей природной среды связано преимущественно с жидкими промышленными сбросами, которые длительное время поступают в примыкающую к АЭС Ольховскую болотно-речную экосистему. Основными загрязнителями

этой системы являются тритий и ^{137}Cs , за ними в порядке убывания следуют ^{60}Co и ^{90}Sr . Прибрежные болотистые образования служат своеобразным природным экраном на пути миграции радионуклидов к береговой зоне и к окружающему болото почвенно-растительному покрову. В результате концентрация ^{137}Cs в профиле почв, граничащих с Ольховским болотом, в 10-20 раз выше, чем на участках удаленных от болота на расстояние 0,5-1 км. В соответствии с повышенным содержанием ^{137}Cs в почвах, примыкающих к Ольховскому болоту, отмечается и относительно высокая его концентрация в растениях, произрастающих на этих участках. В районе ближайшей к АЭС Рефтинской ТЭС не выявлено сколько-нибудь заметного вклада этой станции в радиоактивное загрязнение почвенно-растительного покрова. Вместе с тем, гидроозолоствали, характеризующиеся повышенным содержанием радионуклидов, могут стать со временем источником водного, ветрового рассеяния и дополнительного их поступления в прилегающие экосистемы.

Радиоэкологические исследования в 30-километровой зоне аварии на Чернобыльской АЭС показали, что в пределах геохимических сопряжений наиболее загрязненными радионуклидами оказались растения и почвы лесных насаждений водоразделов, а также задернованные гидроморфные участки речных долин. По причине малого времени с момента аварии не установлено, за редким исключением, заметного перераспределения радионуклидов как по элементам ландшафта, так и по глубине почвенного профиля. В первые послеварийные годы в непосредственной близости от аварийного блока ЧАЭС ^{90}Sr находился в почве в прочнофиксированном состоянии, а по мере удаления от места аварии значительная часть его переходит в ионно-обменные формы. Радиоизотопы цезия находятся в почве преимущественно в виде прочнофиксированных соединений.

Следует отметить, что принятый нами методологический подход сравнительного изучения миграционной способности радионуклидов в основных биогеоценотических звеньях (почва-раствор, почва-растение, почва-растительный покров естественных биогеоценозов) оказался вполне оправданным. Как показали результаты выполненных исследований, такой подход позволил не только дать общую феноменологическую характеристику поведения изучавшихся радионуклидов в системах различной сложности, но и вскрыть в ряде случаев конкретные физико-химические и экологические механизмы, регулирующие подвижность радионуклидов в этих системах.

В целом представленные в работе материалы способствуют пониманию роли почвенно-растительного покрова в процессах миграции и концентрирования радионуклидов, поступающих на поверхность Земли, и создают научный фундамент для решения ряда практических задач, связанных с радиационной безопасностью и рациональным природопользованием.

ВЫВОДЫ

I. Сформулировано новое научное направление – радиоэкология почвенно-растительного покрова, изучающее широкий круг вопросов поступления, миграции и распределения искусственных и естественных радионуклидов в основных компонентах биогеоценозов.

2. Полнота поглощения изучавшихся радионуклидов в почвах из водных растворов практически не зависит от свойств почв и определяется преимущественно физико-химическими особенностями самих радионуклидов. Изменение температурных и щелочно-кислотных условий среди также не влияет на полноту поглощения $^{60}\text{Сe}$, ^{90}Sr , ^{91}Tl , ^{137}Cs в почвах, лишь поглощение ^{59}Fe и ^{144}Ce несколько снижается в области нейтральных и щелочных значений pH, когда эти нуклиды гидролизуются и переходят в коллоидные формы, плохо сорбируемые в почве.

3. Присутствие в растворе искусственных комплексонов, водно-растворимого органического вещества, изотопных и неизотопных носителей повышает миграционную способность радионуклидов в системе почва-раствор. Это повышение определяется реакциями коллоидообразования, а также комплексообразования радионуклидов с органическими аддендами, процессами соосаждения и адсорбции нуклидов с коллоидными соединениями макроносителей, конкурентными взаимоотношениями их с элементами –химическими аналогами.

4. Подвижность радионуклидов в системе почва-раствор, как правило, увеличивается с повышением уровня обводненности почв. На примере относительно малоподвижных радионуклидов ^{137}Cs и ^{144}Ce показано, что основное количество их воднорастворимых форм удерживается в прочносвязанных категориях почвенной влаги и не переходит в свободную гравитационную воду. Для трития выявлена дискриминация его относительно протия при включении этих изотопов в прочнссы-

занные формы почвенной влаги. Отмечена незначительная водная миграция изучавшихся в работе представителей тяжелых естественных радионуклидов, а ^{232}Th практически не переходит в жидкую фазу в условиях обводненности почв в широких пределах.

5. Во всех исследованных почвах наиболее прочно закрепляется ^{59}Fe и ^{137}Cs , а наименее прочно – ^{60}Co , ^{90}Sr и ^{226}Ra ; для последних характерны в значительной степени реакции ионного обмена. Поглощение в почве ^{59}Fe , ^{91}Y , ^{137}Cs , ^{144}Ce , ^{232}Th и ^{238}U является труднообратимым процессом; эти нуклиды прочно связываются органическим веществом почв или адсорбируются по типу изоморфного замещения химических элементов в кристаллических решетках глинистых минералов.

6. Показано постоянство концентраций, коэффициентов накопления и коэффициентов дискриминации радионуклидов по отношению к их стабильным химическим аналогам в системе почва-растение в условиях различной увлажненности почв и установлено повышенное накопление ^{59}Fe , ^{60}Co , ^{91}Y растениями из почв в присутствии искусственного комплексона ЭДТА; отмечены существенные различия в накоплении растениями между искусственно внесенными в почву ^{45}Ca и ^{32}P и их стабильными изотопами, постоянно присутствующими в натуральных почвах.

7. В соответствии с относительно малой подвижностью тяжелых естественных радионуклидов в системе почва-раствор вынос их растениями из почвы не превышает десятых долей процента от внесенного количества, а содержание в водных растворах, свободнофильтрующихся через почву, на I-3 порядка величин ниже, чем в растениях. При поступлении этих радионуклидов с поливной водой доступность их растениям резко повышается по сравнению с внесением непосредственно в почву, а дополнительное внесение в почву фосфорных удобрений снижает доступность растениям ^{238}U .

8. Наибольшей подвижностью в почвах в природных условиях характеризуется ^{59}Fe и ^{144}Ce . В условиях избыточного увлажнения существенную роль в вертикальной миграции ^{90}Sr приобретает конвективный перенос с почвенными растворами, а в условиях переменного увлажнения и дефицита почвенной влаги – диффузия ионов стронция в почве.

9: В периоды интенсивных глобальных выпадений максимальное содержание радионуклидов в условиях тундры приходится на долю мохово-торфянистого покрова. При этом ^{90}Sr по сравнению с ^{137}Cs

характеризуется большей миграционной способностью как в профиле почв, так и в ландшафте в целом. В периоды стабилизации радиоактивных выпадений из атмосферы ^{90}Sr более равномерно распределяется между растительным покровом, лесной подстилкой и почвенными горизонтами; а ^{137}Cs в этих условиях преимущественно концентрируется в наиболее гумусированном дерновом слое почв, расположенным непосредственно под лесной подстилкой.

II. Впервые дана сравнительная оценка радиоактивного загрязнения почвенно-растительного покрова в зонах нормально функционирующих Белоярской атомной и Рефтинской тепловой электростанций на Урале. Установлено, что газоаэрозольные выбросы этих станций в настоящее время не вносят существенного вклада в радиоактивное загрязнение почвенно-растительного покрова. Радионуклидное загрязнение природной среды связано в основном с жидкими промышленными сбросами атомной электростанции и гидроэзотвалами тепловой станции. Показана роль Ольховской болотно-речной экосистемы в зоне Белоярской АЭС как источника возможного радиоактивного загрязнения примыкающего почвенно-растительного покрова. Установлено, что прибрежные болотистые образования служат своеобразным природным барьером на пути миграции радионуклидов к окружающему болоту почвенно-растительному покрову.

III. Изучены уровни содержания и закономерности миграции радионуклидов в почвенно-растительном покрове сопряженных по стоку участков ландшафта в 30-км зоне аварии на Чернобыльской АЭС. По содержанию в почвенно-растительном покрове радионуклиды располагаются в ряду: $^{137}\text{Cs} > ^{134}\text{Cs} > ^{90}\text{Sr}$ при более высокой плотности загрязнения в непосредственной близости от АЭС. На первых этапах миграционных процессов не обнаружено заметного перераспределения радионуклидов как в ландшафте, так и по глубине почвенного профиля. В пределах геохимических сопряжений наиболее "загрязнены" растения и почвы лесных насаждений водораздельных территорий, а также задернованных гидроморфных участков речных долин. Минимальное загрязнение приурочено к слабогумусированным пескам оステненных прирусловых валов. В непосредственной близости от аварийного блока ^{90}Sr находится в почве в прочнофиксированном состоянии, а по мере удаления от места аварии значительная его часть закрепляется по типу реакций ионного обмена. Радиоизотопы цезия в почвах 30-км зоны ЧАЭС находятся преимущественно в виде прочнофиксированных соединений.

12. Показано, что принятый в процессе выполнения докторской работы методологический подход изучения миграционной способности радионуклидов в системах различной сложности позволил дать не только общую сравнительную картину миграции и распределения радионуклидов, но и вскрыть основные механизмы, регулирующие их подвижность в этих системах. Выявленные особенности поведения радионуклидов следует учитывать при проведении комплексных радиоэкологических исследований по оценке радиационной обстановки отдельных регионов и разработке основ экологического мониторинга в районах предприятий ядерного топливного цикла.

ОСНОВНЫЕ РАБОТЫ, ОПУБЛИКОВАННЫЕ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ:

1. Махонина Г.И., Молчанова И.В., Субботина Е.Н., Тимофеев-Ресовский Н.В., Титлянова А.А., Тюруканов А.Н. Опыт экспериментального исследования распределения радиоизотопов в естественных биогеоценозах// Докл.АН СССР. - 1960. - Т.133, № 2. - С.484-488.

2. Махонина Г.И., Молчанова И.В. Исследование поведения микрокаличества железа и цинка в почвах// Науч.докл.высш.шк. Биол.науки. - 1961. - № 4. - С.218-225.

3. Молчанова И.В. О влиянии железа на поведение иттрия-91 в дерново-луговой почве// Науч.докл.высш.шк. Биол.науки. - 1965. - № 2. - С.201-204.

4. Молчанова И.В., Титлянова А.А. К вопросу о поведении микрокаличеств иттрия и церия в почве// Радиохимия. - 1965. Т.7, вып.6. - С.687-692.

5. Молчанова И.В. О поведении иттрия-91 в некоторых типах почв// Тр./Ин-т биологии УФАН СССР. - 1965. - Вып.45. - С.91-97.

6. Махонина Г.И., Молчанова И.В., Субботина Е.Н., Тимофеев-Ресовский Н.В., Титлянова А.А., Тюруканов А.Н., Чеботина М.Я. Распределение Fe-59, Co-60, Zn-65, Sr-90, Ru-106, Cs-137 и Ce-144 по компонентам биогеоценоза// Тр./Ин-т биологии УФАН СССР. - 1965, - Вып.45, - С.121-127.

7. Молчанова И.В. О поведении церия-144 в некоторых типах почв// Тр./Ин-т экологии растений и животных УФАН СССР. - 1968. - Вып.61. - С.4-10.

8. Молчанова И.В. Поступление микрокаличеств радиоизотопов иттрия-91 и церия-144 в растения из растворов и почв// Там же. - С.31-34.

9. Молчанова И.В. Экспериментальное изучение поведения радиоизотопов железа, иттрия и церия в системе почва-раствор-рас-

тение: Автореф.дис. ...канд.биол.наук. - Свердловск, 1968. - 19 с.

10. Молчанова И.В., Куликов Н.В. О распределении стронция-90 и цезия-137 в почвенно-растительном покрове тундры// Докл. АН СССР. - 1970. - Т.195, № 4. - С.959-961.

11. Молчанова И.В., Миронов Б.А., Куликов Н.В. О методике экспериментального изучения миграции стронция-90 в почве лесных биогеоценозов// Методы радиоэкологических исследований. - М., 1971. - С.34-39.

12. Молчанова И.В., Миронов Б.А., Куликов Н.В. Распределение Sr-90 в почвенно-геохимических ландшафтах Северного и Южного Урала// Радиобиология. Информ.бюллетень. - 1971. - Вып.13. - С.26-30.

13. Молчанова И.В., Караваева Е.Н. Распределение радиоизотопов в системе почва-почвенный раствор-растение в зависимости от влажности почвы// Экология. - 1971. - № 1. - С.107-109.

14. Караваева Е.Н., Молчанова И.В. О поступлении химических элементов-аналогов (^{90}Sr -Са и ^{137}Cs -К) в растения в зависимости от влажности почвы// Экология. - 1971. - № 5. - С.96-98.

15. Молчанова И.В., Куликов Н.В. Радиоактивные изотопы в системе почва-растение. - М.:Атомиздат, 1972. - 85 с.

16. Молчанова И.В., Караваева Е.Н., Куликов Н.В. Влияние влажности почвы на поступление стронция-90 в растения// Экология. - 1972. - № 3. - С.78-80.

17. Чеботина М.Я., Молчанова И.В. Влияние растительного опада на вертикальную миграцию стронция-90 в почве// Экология. 1972. - № 6. - С.84-85.

18. Куликов Н.В., Молчанова И.В., Караваева Е.Н. Влияние режима почвенного увлажнения на переход Sr-90, Cs-137 и Ce-144 из почвы в раствор// Экология. - 1973. - № 4. - С.57-62.

19. Молчанова И.В., Куликов Н.В., Пискунов Л.И. Экспериментальное изучение миграции стронция-90 в почвах лесных биогеоценозов// Экология. - 1973. - № 5. - С.61-65.

20. Куликов Н.В., Молчанова И.В. О снижении содержания ^{90}Sr в почвенно-растительном покрове тундры// Экология. - 1974. - № 2. - С.69-70.

21. Молчанова И.В., Чеботина М.Я. О роли опада древесных растений в вертикальной миграции ^{90}Sr в почве// Экология. - 1975. - № 2. - С.78-80.

- 90 22. Куликов Н.В., Молчанова И.В., Пискунов Л.И. О миграции ^{90}Sr в почвенно-растительном покрове субарктической тундры// Экология. - 1975. - № 3. - С.88-90.
23. Караваева Е.Н., Молчанова И.В., Куликов Н.В. Влияние влажности почвы на поведение стронция-90, цезия-137 и церия-144 в системе почва-раствор// Радиоэкологические исследования почв и растений. - Свердловск, 1975. - С.3-12.
24. Молчанова И.В., Караваева Е.Н. Роль органического вещества и почвенного увлажнения в процессе перехода цезия-137 и церия-144 из почвы в раствор// Там же. - С.13-15.
25. Куликов Н.В., Молчанова И.В., Пискунов Л.И. Миграция стронция-90 и цезия-137 в лесных почвах// Там же.-С.26-34.
26. Куликов Н.В., Молчанова И.В. Континентальная радиоэкология (почвенные и пресноводные экосистемы). - М.:Наука, 1975. - 182 с.
27. Молчанова И.В., Караваева Е.Н. Зависимость вертикальной миграции стронция-90 в почве от режима почвенного увлажнения// Экология. - 1976. - № 3. - С.105-106.
28. Куликов Н.В., Молчанова И.В., Чеботина М.Я., Караваева Е.Н. Влияние растительных экстрактов на подвижность радионуклидов в почве в зависимости от условий увлажнения// Экология. - 1977. - № 2. - С.82-85.
29. Караваева Е.Н., Молчанова И.В. Роль некоторых категорий почвенной влаги в вертикальном перемещении ^{90}Sr и ^{137}Cs в почве// Экология. - 1979. - № 1. - С.48-52.
30. Молчанова И.В., Чеботина М.Я., Караваева Е.Н., Куликов Н.В. Влияние опада древесных растений и условий его разложения на миграцию радионуклидов в почве// Проблемы лесной радиоэкологии. - М., 1979. - С.114-123. - (Тр./Ин-т приклад.геофизики. Вып.38).
31. Молчанова И.В., Боченина Н.В. Мхи как накопители радионуклидов// Экология. - 1980. - № 3. - С.42-47.
32. Молчанова И.В., Михайловская Л.Н. О прочности закрепления радионуклидов в почвах и озерных грунтах// Радиоактивные изотопы в почвенно-растительном покрове. - Свердловск, 1979. - С.22-28.
33. Молчанова И.В., Караваева Е.Н. Миграция ^{90}Sr и ^{137}Cs в почве с капиллярной влагой// Там же. - С.29-33.
34. Караваева Е.Н., Молчанова И.В., Куликов Н.В. Режим поч-

венного увлажнения и миграция радионуклидов в почвенно-растительном покрове// Там же. - С.3-16.

35. Kulikov N.V., Molchanova I.V. Continental radioecology. M.: Plenum Press, Nauka publisher, 1981. - 174p.

36. Молчанова И.В., Караваева Е.Н. Распределение ^{90}Sr и ^{137}Cs в мохово-торфянистых отложениях верхового болота// Экология. - 1981. - № 5. - С.86-88.

37. Молчанова И.В., Караваева Е.Н., Чеботина М.Я., Куликов Н.В. Распределение ^{90}Sr и ^{137}Cs по компонентам болотно-речной экосистемы// Экология. - 1982. - № 2. - С.45-49.

38. Молчанова И.В., Караваева Е.Н. Влияние температурных условий на подвижность радионуклидов в системе почва-растение// Экология. - 1983. - № 6. - С.68-70.

39. Молчанова И.В., Михайловская Л.Н. Формы радионуклидов в почвах различной степени увлажненности// Поведение радиоизотопов в водоемах и почвах. - Свердловск, 1983. - С.55-63.

40. Караваева Е.Н., Молчанова И.В. Распределение трития по некоторым категориям почвенной влаги// Там же. - С.64-68.

41. Молчанова И.В., Караваева Е.Н. Распределение ^{90}Sr и ^{137}Cs в геохимически сопряженных участках ландшафта// Экология. - 1985.-№ 1. - С.69-72.

42. Караваева Е.Н., Молчанова И.В., Шехурина Н.И. Вертикальная миграция трития в системе почва-растение// Экология. - 1985. - № 3. - С.85-87.

43. Молчанова И.В., Караваева Е.Н., Куликов Н.В. Некоторые итоги радиоэкологического изучения природных экосистем в зоне Белоярской АЭС// Экология. - 1985. - № 5. - С.30-34.

44. Караваева Е.Н., Молчанова И.В., Чеботина М.Я. ^{90}Sr и ^{137}Cs в компонентах болотно-речной экосистемы в районе Белоярской АЭС// Радиационная безопасность и защита АЭС. - М., 1985. - Вып.9. - С.175-177.

45. Молчанова И.В., Архилов Н.П., Михайловская Л.Н., Мартюшов В.В. Использование шахтных вод для полива сельскохозяйственных растений// Экология. - 1986. - № 5. - С.77-80.

46. Молчанова И.В., Караваева Е.Н., Михайловская Л.Н. Поведение ^{236}U и ^{232}Th в системе почва-раствор-растение// Естественные и трансуранные радионуклиды в окружающей среде. - Свердловск, 1986. - С.42-50.

47. Кононович А.Л., Молчанова И.В., Трапезников А.В., Карап

ваева Е.Н., Куликов Н.В. К проблеме нормирования радиоактивного загрязнения водных экосистем в зоне АЭС// Экология. - 1988. - № 4. - С.29-34.

48. Куликов Н.В., Молчанова И.В. Радиоэкологические исследования в зонах атомных электростанций// Радиоэкологические исследования компонентов модельных и природных экосистем. - Свердловск, 1988. - С.3-12.

49. Молчанова И.В., Караваева Е.Н., Таскаев А.И., Щуктомова И.И., Куликов Н.В. Радионуклиды в почвенно-растительном покрове в зоне тепловой электростанции// Там же. - С.13-21.

50. Молчанова И.В., Архипов Н.П., Февралева Л.Т., Михайловская Л.Н. Поведение солей и естественных радионуклидов в орошаемой почве// Там же. - С.34-45.

51. Куликов Н.В., Молчанова И.В., Караваева Е.Н. Радиоэкологическое изучение природных экосистем в зоне Белоярской АЭС// Методы биоиндикации окружающей среды в районах АЭС. - М.: Наука, 1988. - С.137-142.

52. Молчанова И.В., Караваева Е.Н., Куликов Н.В. Радиоэкологическое изучение почвенно-растительного покрова сопряженных участков ландшафта в зоне Чернобыльской АЭС// Экология. - 1990. - № 3. - С.30-35.

ll начерт.

Подписано к печати 25 февраля 1991 г.

Отпечатано на ротапринте ИФМ УрО АН СССР тираж 100
заказ 26 формат 60x84 I/16
бесплатно