УРАЛЬСКИЙ ФИЛИАЛ АКАДЕМИИ НАУК СССР
ИНСТИТУТ БИОЛОГИИ

На правах рукописи

Н. А. ТИМОФЕЕВА

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИЗУЧЕНИЕ ПОВЕДЕНИЯ РАДИОСТРОНЦИЯ В ПРЕСНОВОДНЫХ И НАЗЕМНЫХ БИОГЕОЦЕНОЗАХ

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени кандидата биологических наук

СВЕРДЛОВСК · 1964

УРАЛЬСКИЙ ФИЛИАЛ АКАДЕМИИ НАУК СССР
ИНСТИТУТ БИОЛОГИИ

На правах рукописи

Н. А. ТИМОФЕЕВА

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИЗУЧЕНИЕ ПОВЕДЕНИЯ РАДИОСТРОНЦИЯ В ПРЕСНОВОДНЫХ И НАЗЕМНЫХ БИОГЕОЦЕНОЗАХ

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени кандидата биологических наук

СВЕРДЛОВСК 1964

Работа выполнена в лаборатории биофизики Института биологии Уральского филиала АН СССР.

О дне и времени защиты будет объявлено за 10 дней в газете «Уральский рабочий» или «Вечерний Свердловск».

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке Института биологии Уральского филиала АН СССР (г. Свердловск, ул. 8 Марта, 202).

Отзывы и пожелания просим направлять по адресу: г. Свердловск, ул. 8 Марта, 202, ученому секретарю объединенного ученого совета кандидату биологических наук Г. С. Хреновой.

Автореферат разослан
Защита назначена на 18 декабря 1964 г

ВВЕДЕНИЕ

После того как В. И. Вернадским было создано общее учение о биосфере и биогеохимии как особой дисциплине (Вернадский, 1926, 1929, 1934, 1940), появилась возможность сознательно и точно изучать судьбу целого ряда химических элементов (особенно рассеянных и редких) в гидросфере и коре выветривания Земли с учетом влияния на нее жизнедеятельности живых организмов. Позднее В. Н. Сукачевым была разработана биогеоценология (дисциплина, пограничная между биоценологией и биогеохимией) и точно сформулировано понятие биогеоценоза, являющегося основной ячейкой биогеохимических процессов в биосфере (Сукачев, 1945, 1947, 1948). Интерес к биогеоценологическим исследованиям (особенно экспериментальным, проводившимся с применением метода меченых атомов на модельных системах) за последнее десятилетие все возрастает. Это связано с тем, что, во-первых, редкие и рассеянные элементы стали играть большую роль в промышленности, во-вторых, все большее значение приобретает учение о роли микроэлементов в жизни растений и животных и, наконец, проблема изучения поведения микроколичеств химических элементов в отдельных участках биосферы связана с глобальными и местными загрязнениями почвы, растительного покрова и водоемов радиоактивными элементами.

Точное знание механизмов миграции радиоактивных элементов и основных факторов, определяющих их поведение в отдельных участках биосферы, связано с необходимостью прогнозирования возможных радиоактивных загрязнений отдельных участков и разработки научных основ борьбы с ними. Основную массу радиоактивных загрязнений биосферы составляют долгоживущие радиоизотопы: стронций^{90}, рутений^{106}, цезий^{137}, церий^{144} (Марей, 1957). Относительная же опасность, с точки зрения загрязнения среды этими изотопами, определяется количеством радиоэлемента, периодом полураспада, эффективностью

перехода через трофические цепи в организм человека, локализацией в нем и временем выведения из него. Исходя из этого, наибольшую опасность из радиоактивных элементов, перечисленных выше, представляет стронций^{90}, который имеет не только большой период полураспада и полувыведения из организма, но и, являясь аналогом кальция, локализуется в скелетных образованиях многих живых организмов. Откладываясь в костной ткани, радиостронций образует длительное депо излучателя в теле, могущее даже при относительно невысоких концентрациях привести к отдаленным эффектам облучения. С этим в основном и связана опасность радиостронция, как «загрязнителя» биосферы, для человека.

Несмотря на большой фактический материал, накопленный за последнее десятилетие в области изучения поведения радиостронция в отдельных участках биосферы (почва — растение, континентальные воды, моря), этот вопрос остается недостаточно изученным. Еще слишком мало данных, чтобы можно было оценить роль тех или иных процессов, которые могут привести в течение нескольких десятков лет к рассеиванию радиостронция или же к его концентрированию в отдельных участках. Главное же заключается в том, что разными авторами отдельные вопросы, связанные с общей проблемой судьбы радиостронция в биосфере, изучаются с разных точек зрения и различными методами. Все это затрудняет составление сводки сравнимых данных, которые бы дали общую картину поведения радиостронция в биосфере.

В связи с этим в задачу настоящего исследования входило дальнейшее экспериментальное изучение поведения радиостронция в основных компонентах как пресноводных, так и наземных биогеоценозов. При этом особое внимание в этих исследованиях уделялось анализу различных факторов, влияющих на поведение радиостронция.

Диссертационная работа состоит из следующих основных разделов: I. Введение. II. Материал и методика. III. Результаты опытов и их обсуждение. IV. Заключение. V. Выводы. VI. Литература.

Объем диссертации — 107 страниц с 16 рисунками и 40 таблицами. Список литературных данных включает 159 работ (советских и иностранных). Ниже изложено основное содержание диссертации.

Материал и методика

Во всех опытах, проводившихся по разным разделам работы, применялся радиоактивный изотоп стронция — стронций^{90}.

В качестве материала для изучения накопления радиостронция пресноводными организмами и влияния некоторых факторов на его накопление были взяты следующие виды растений: из низших — кладофора (Cladophora glomerata L.), хара (Chara aspera Wild.), из высших — элодея (Elodea canadensis Rich.), уруть (Myriophyllum spicatum L.), роголистник (Ceratophyllum demersum L.), ряска (Lemna minor L.). Из животных два вида моллюсков — большой прудовик (Limnea stagnalis L.), болотный прудовик (Galba palustris Müll.), кладки этих видов и кладки пузырчатой улитки (Physa fontinalis L.). Кроме того, в работе были использованы и другие виды пресноводных гидробионтов (примерно 40 видов). Для изучения накопления радиостронция наземными растениями были взяты следующие виды: из семейства мотыльковых — горох (Pisum sativum L.), вика (Vicia sativa L.), клевер (Trifolium medium L.), люцерна (Medicago sativa L.), тыквенных — огурцы (Cucumis sativus L.), зонтичных — морковь (Daucus carota L.), петрушка (Petroselinum sativum Hoffm.), маревых — свекла (Beta vulgaris L.), пасленовых — картофель (Solanum tuberosum L.), лилейных — лук (Allium cepa L.), чеснок (Allium Sativum L.) и злаковых — ячмень (Hordeum sativum L.). Изучение поведения радиостронция в системе «раствор—почва» проводилось на разных почвах, принадлежащих к различным почвенно-географическим зонам: чернозем, гор. A_1 (Курский Центрально-черноземный заповедник), дерново-луговая, гор. A_1 (Южный Урал, Ильменский заповедник), краснозем, гор. A_1 (Грузия, Зугдидский р-н), дерново-подзолистая, гор. A_1 (Московская область). Экспериментальные растворы готовились на дистиллированной или отфильтрованной озерной воде (содержание кальция — 28 *мг/л*, магния— 8,5 *мг/л*, натрия — 6 *мг/л*, калия — 4 *мг/л*). Концентрация радиостронция в опытах варьировала от 0,01 до 10 *мккюри/л* раствора или от 10 до 50 *мккюри/кг* почвы. Для опытов по изучению миграции радиостронция в природных условиях были использованы травянистые фитоценозы Южного Урала и Таджикистана.

Для радиометрического определения стронция ^{90} использовались счетные трубки типа «Т-25 БФЛ» с толщиной окна 1,8—2 *мг/см*^{2}. Импульсы регистрировались с помощью пересчетных установок типа «Б-2». Часть почвенных проб, которые имели низкую удельную радиоактивность, измерялась с помощью универсального радиометра типа «ТИСС», датчик которого помещался в свинцовую защиту. Все пробы просчитывались после установления радиоактивного равновесия между стронцием ^{90}

и его дочерним продуктом — иттрием[91]. Все результаты измерений пересчитывались на миллилитр воды или грамм сухого веса вещества.

Для характеристики накопления радиостронция разными видами пресноводных организмов и возможности сравнения полученных результатов применялись коэффициенты накопления (отношение концентрации радиостронция в живом организме к его концентрации в воде).

Опыты с пресноводными организмами проводились в стеклянных сосудах, в которые помещались озерная вода, грунт и живые организмы (растения, моллюски). В опытах, в которых изучалась зависимость накопления радиостронция пресноводными растениями от концентрации стронция, кальция, магния в воде, в сосуды добавлялись соответствующие катионы в виде азотнокислых солей. Продолжительность разных опытов варьировала от 1 до 90 суток. После окончания опыта или через определенные промежутки времени в течение опыта отбирались пробы воды и живых организмов для определения в них концентрации радиостронция, а в некоторых — кальция и магния. Все опыты проводились не менее чем в двух повторностях.

Опыты по изучению сорбции радиостронция почвами и десорбции из них проводились в динамических и статических условиях. Динамические опыты проводились в стеклянных колонках, которые заполнялись исследуемой почвой (20 *г*). Через почвенный фильтр пропускался водный раствор радиостронция (сорбция) или же озерная вода (десорбция). Фильтрат измерялся в «объемах», равных объему почвенного фильтра. После пропускания определенного количества «объемов» (обычно 100) раствора радиостронция или десорбирующего раствора почва из колонки извлекалась и проводился послойный анализ распределения радиостронция по глубине почвенного фильтра. Статические опыты проводились в плексигласовых пробирках (емкостью 50 *мл*), в которые помещались определенная навеска почвы (1 *г*) и раствор радиостронция (сорбция) или раствор соответствующего катиона и почва, содержащая радиостронций (десорбция). Почва с раствором перемешивалась до установления равновесия (1 *ч*) радиостронция между жидкой и твердой фазами. Количество радиостронция, поглощенного почвой (сорбция) или перешедшего в раствор из почвы (десорбция), определялось по разностям исходных и конечных радиоактивностей растворов или почв.

Опыты по изучению накопления радиостронция наземными растениями проводились в вегетационных сосудах, которые

заполнялись заранее «загрязненной» радиостронцием почвой. В эту почву высаживались проросшие семена монокультур разных видов растений.

Опыты по изучению поведения радиостронция в модельных или природных биогеоценозах проводились в ящиках (размером 80×50 *см*) и на опытных площадках биогеоценозов Южного Урала и Таджикистана. Опыты на площадках проводились по следующей схеме. На экспериментальном залежном поле выбирался небольшой участок, в центр которого в небольшую лунку (глубина 3 *см* и диаметр 5 *см*) вносился раствор радиостронция (100 *мл*). Через определенные промежутки времени с начала опыта на разных расстояниях от места внесения брались пробы растений и почв для радиометрического анализа. В конце опыта делался вертикальный почвенный разрез (длина 2 *м* и глубина 70 *см*) через место внесения радиостронция. Из почвенного разреза на разных расстояниях и с разных глубин от места внесения (через каждые 5 *см*) брались пробы почв на радиометрический анализ.

Опыты по изучению роли растительного покрова и его видового состава на миграцию радиостронция из мест «загрязнения» проводились следующим образом: в почву, которая находилась в ящиках, высаживались рядами проросшие семена растений (ячмень и клевер). Под один ряд растений в почву вносился радиостронций. Ящики, в которые не высаживались растения, служили контролем. Через 2 месяца с разных расстояний от места внесения радиостронция брались пробы почв и растений для определения в них содержания радиостронция.

Результаты опытов

Результаты исследований изложены в соответствии с разделами диссертационной работы.

1. Поведение радиостронция в системе «раствор — почва».

Основные факторы, определяющие миграцию химических элементов в биосфере, можно разделить на внутренние, связанные со свойствами самих элементов и их соединений, и внешние, определяющие свойства среды, в которой находится данный элемент. В связи с этим в опытах при изучении поведения радиостронция в системе «почва — раствор» изучалась сорбция радиостронция разными почвами и десорбция с их растворами, содержащими разные катионы, влияние содержания стабильного стронция, суммы обменных катионов и органического

вещества на сорбцию радиостронция почвами, а также время нахождения радиостронция в почве на прочность связи его с ней.

Результаты опытов показали, что радиостронций поглощается почвами в результате ионообменных реакций. В почвах он находится в подвижной форме и легко может быть вытеснен из них другими катионами. Изучение влияния разных катионов, присутствующих в растворе, на десорбцию радиостронция из почвы показало, что процент десорбции радиостронция из почвы при прочих равных условиях зависит от природы десорбирующего катиона (табл. 1).

Таблица 1

Десорбция радиостронция из почв растворами, содержащими катионы
(отношение почвы к раствору 1 : 20)

Почва	Десорбирующий раствор				
	NH_4^+	K^+	Na^+	Mg^{++}	Ca^{++}
	процент десорбции радиостронция				
Дерново-луговая, гор. A_1	13,4	11,7	7,3	39,0	43,0
Подзолистый краснозем, гор. A_1	36,0	16,6	10,0	56,0	79,0

По вытесняющей способности все изученные в опытах катионы можно расположить в ряд, который находится в соответствии с теорией ионного обмена: кальций > магний > аммоний > калий > натрий. Процент сорбции радиостронция разными почвами из раствора, содержащего кальций, в значительной степени зависит от суммы обменных катионов в почве. Данные этих опытов для некоторых почв представлены в таблице 2. Так как в опытах по сорбции радиостронция почвами не получено корреляции между содержанием гумуса и процентом поглощения радиостронция из растворов (см. табл. 2), то были поставлены дополнительные опыты с варьированием в системе «раствор — почва» содержания гумуса (от 1,7 до 12%) при постоянном количестве обменных катионов в системе (0,44 *м·экв* в почве и 0,5 *м·экв* в растворе). Результаты этих опытов показали, что содержание гумуса в почвах не оказывает прямого влияния на поглощение радиостронция почвами. Изучение влияния стабильного стронция на поведение радиостронция в системе

Таблица 2

Сорбция радиостронция разными почвами из раствора азотнокислого кальция и дистиллированной воды
(отношение почвы к раствору 1 : 20)

Почва	Содержание гумуса по Тюрину (%)	Содержание обменных катионов в *м·экв* на 100 *г* почвы		Процент сорбции радиостронция	
		Mg^{++}	Ca^{++}	из дистиллированной воды	из раствора кальция (0,5 *м·экв* на объем)
Каштановая почва (0—10 *см*)	5,5	4,5	14,5	97,4	51
Дерново-луговая (0—15 *см*)	11,9	14,0	30,5	98,7	69
Воронежский чернозем (0—10 *см*)	11,1	4,9	24,1	98,0	61
Серые лесные средне оподзоленные (0—10 *см*)	5,9	2,7	13,2	98,5	27
Подзолистый краснозем (0—10 *см*)	5,7	0,2	12,0	98,1	16,7
Дерново-луговая (4—14 *см*)	12,41	0,8	36,6	96,0	60,2
Светло-серая лесная (18—36 *см*)	0,98	12,4	9,2	95,0	24,2
Чернозем карбонатный (40—60 *см*)	1,79	15,8	18,3	94,0	42,3

«почва — раствор» показало, что увеличение общей концентрации стабильного стронция в данной системе в пределах микроконцентраций не влияет на поведение радиостронция. Процент сорбции радиостронция почвой из растворов, содержащих разные количества стабильного стронция (10^{-7}—10^{-6}—10^{5}—10^{-4}M), и последующей десорбции из этих почв не зависел от общей концентрации стронция в системе и заметно менялся лишь при переходе к макроконцентрациям ($>10^{-4}$M). Результаты опытов по десорбции радиостронция разными растворами (дистиллированная вода, 0,1 н. раствор азотнокислого кальция и 0,1 н. азотная кислота) из почвы, в которой он находился около трех лет, показали, что с течением времени радиостронций из подвижной формы (обменная) частично перешел в менее подвижную форму (необменная). Изменение формы связи радиостронция с почвой, возможно, объясняется переходом его в карбонатные или фосфатные формы. Сравнение поведения радиостронция в системе «раствор — почва» с поведением других радиоизото-

пов (кобальт^{60}, ниобий^{95}, цирконий^{95}, рутений^{106}, цезий^{137}, церий^{144}) показало, что радиостронций является самым подвижным элементом.

2. Изучение поведения радиостронция в модельных пресных водоемах.

В этой главе описываются результаты опытов, которые проводились нами в связи с изучением судьбы радиостронция, попадающего в пресные водоемы. В опытах изучалось поглощение радиостронция илом, песком, золой, шлаком, накопление его некоторыми представителями пресноводных организмов, динамика накопления, влияние содержания в воде стронция, кальция, магния, удельной радиоактивности на накопление радиостронция живыми организмами и распределение его по основным компонентам водоема (вода, грунт, биомасса). Из экспериментально полученных данных определялись коэффициент дискриминации при поглощении радиостронция и кальция пресноводными организмами и коэффициент соосаждения радиостронция с карбонатами кальция (биогенного происхождения). Результаты всех этих опытов сводятся к следующему. Изучение поглощения радиостронция различными путями из озерной воды и дальнейшее поступление с ними в осадок показало, что мелкодисперсные фракции песка, озерного ила, шлака и древесной золы заметно очищают воду от радиостронция. Наибольшей сорбционной способностью обладали древесная зола (98%), ил (60%), наименьшей — песок (1—2%).

Таблица 3

Средние коэффициенты накопления радиостронция для некоторых групп пресноводных организмов

Группа организмов	Число видов	Коэффициент накопления
Низшие растения .	12	490
Высшие растения . .	21	430
Моллюски	9	595
Личинки насекомых .	8	72
Ракообразные	4	257

Изучение накопления радиостронция 58 видами гидробионтов показало, что радиостронций дает невысокие коэффициенты накопления (отношение концентраций радиостронция в организме и воде) и разница в средних коэффициентах накопления у растений (460) и животных (308) невелика. Разброс значений

коэффициентов накопления радиостронция у разных видов, в отличие от других радиоизотопов, относительно невелик и лишь у двух видов растений (элодея и кладофора) и одного вида животных (большой прудовик) найденные коэффициенты накопления заметно превышали среднее значение. В таблице 3 приведены усредненные значения коэффициентов накопления радиостронция по основным группам пресноводных организмов — низшие и высшие растения, моллюски, ракообразные, личинки насекомых. Для сравнения накопления радиостронция с другими радиоизотопами в работе приводятся усредненные значения коэффициентов накопления 15 различных радиоизотопов растениями и животными.

Результаты опытов по динамике накопления радиостронция 6 видами пресноводных организмов (кладофора, хара, элодея, уруть, ряска и большой прудовик) показали, что коэффициенты накопления радиостронция у некоторых видов сравнительно быстро (в течение первых 2 суток) устанавливаются на определенном уровне и в дальнейшем лишь флюктуируют вокруг среднего значения; у других же видов (например, в раковине моллюсков, у ряски) коэффициенты накопления со временем постепенно возрастают. В таблице 4 приведены результаты опытов по изучению накопления радиостронция во времени элодеей, ряской и большим прудовиком.

Таблица 4

Динамика накопления радиостронция пресноводными растениями

Вид	2 суток			4 суток			8 суток			16 суток		
	концентрация стронция ^{90} в *имп/мин* на											
	мл воды	*г* сухого вещества	коэффициент накопления	*мл* воды	*г* сухого вещества	коэффициент накопления	*мл* воды	*г* сухого вещества	коэффициент накопления	*мл* воды	*г* сухого вещества	коэффициент накопления
Элодея	350	$213 \cdot 10^3$	615	300	$240 \cdot 10^3$	800	265	$233 \cdot 10^3$	850	242	$198 \cdot 10^3$	820
Ряска	402	$104 \cdot 10^3$	260	390	$115 \cdot 10^3$	340	370	$150 \cdot 10^3$	405	230	$140 \cdot 10^3$	610
Большой прудовик	250	$12 \cdot 10^3$	50	212	$84 \cdot 10^3$	400	198	$208 \cdot 10^3$	1050	180	$260 \cdot 10^3$	1450

Опыты с добавлением в воду стабильного стронция (10^{-6},—10^{-5}, 10^{-4},—10^{-3}М) показали, что коэффициенты накопления радиостронция растениями не зависят от содержания стронция в воде в пределах микроконцентраций (10^{-6}, 10^{-5}, 10^{-4}М) и лишь при переходе к макроконцентрациям (10^{-3}М) они заметно понижаются. Варьирование удельной активности радиостронция (от 10^{-9} до 10^{-5} *кюри/л*) на фоне общего содержания стабильного стронция в озерной воде (10^{-6}М) не влияет на коэффициенты накопления радиостронция, то есть радиостронций поглощается растениями из разных по удельной радиоактивности растворов относительно одинаково. Данные одного из этих опытов приведены в таблице 5. Экспериментально показано, что с повы-

Таблица 5

Накопления радиостронция элодеей и кладофорой из растворов разной удельной радиоактивности

Вид	Концентрация радиостронция в воде, *кюри/л*	Концентрация радиостронция в *имп/мин* на		Коэффициент накопления
		мл воды	*г* сухого веса растений	
Элодея	10^{-8}	6,3	3400	540±16
	10^{-7}	29,6	15800	535±13
	10^{-6}	308	160000	520±12
	10^{-5}	2580	1470000	570±24
Кладофора	10^{-8}	6,36	4814	760±14
	10^{-5}	3250	2415000	748±14

шением содержания кальция (30, 60, 120, 280 и 480 *мг/л*) и магния (10, 20, 30, 60 *мг/л*) в воде коэффициенты накопления радиостронция элодеей, кладофорой, урутью и роголистником уменьшаются. В таблице 6 приведены данные опытов по изучению накопления радиостронция кладофорой из воды, содержащей разные количества кальция и магния. При этом необходимо

отметить, что иногда в условиях опытов происходит сильное выделение на поверхности растений (ряска, роголистник, уруть и кладофора) карбонатов кальция. Так как с карбонатами кальция (в силу изоморфизма) захватывается и радиостронций, то в растениях концентрация радиостронция завышается за счет карбонатов и в этом случае четкой картины зависимости накопления радиостронция от содержания кальция в воде не получается.

Таблица 6

Зависимость накопления радиостронция кладофорой от содержания кальция и магния в воде

Вариант	Содержание катионов в воде, *мг/л*				Концентрация радиостронция в *имп/мин* на		Коэффициент накопления радиостронция
	Mg++		Ca++				
	в начале опыта	в конце опыта	в начале опыта	в конце опыта	*мл* воды	*г* сухого веса растения	
I	9,8	—	30	14	32	33500	1050±22
II	9,8	—	60	22	30	25500	850±32
III	9,8	—	120	61	45	19300	430±9
IV	9,8	—	240	161	36	6575	182±6
V	9,8	—	480	415	32	3100	97±2
I	9,8	9,6	29	16	29	27800	915±44
II	19	19,0	29	18	37	22500	615±35
III	29	28,0	29	19	40	20150	500±22
IV	50	51,0	29	21	45	12865	285±17

Известно, что разные химические элементы поглощаются организмами не в тех количественных отношениях, в которых они обычно встречаются в среде обитания; это находит свое выражение в том, что коэффициенты накопления разных химических элементов одним и тем же видом живых организмов отличаются друг от друга. Для оценки относительного поглощения радиостронция и кальция из среды обитания живыми организмами рядом авторов (Comar et al., Pickering et al) применяется так называемый коэффициент дискриминации. Этот коэффициент отражает разницу между количественными отношениями стронция и кальция в организме и среде, то есть разницу между коэффициентами накопления этих двух элементов организмами. Найденные коэффициенты накопления радиостронция и кальция некоторыми пресноводными организмами позволили нам определить коэффициент дискриминации этих двух элементов

при поглощении их урутью, элодеей, роголистником, кладофорой и тремя видами моллюсков (большой прудовик, болотный прудовик, пузырчатая улитка). Как показали результаты этих определений, величина коэффициента дискриминации варьирует от вида к виду. Так, для элодеи и роголистника она равна примерно 1, для урути и кладофоры 0,6, а для моллюсков (раковина) 0,3. При этом найденная величина для данного вида не зависит от концентрации кальция в воде. Для карбонатного осадка, который выделяется на поверхности растений, величина коэффициента дискриминации (или коэффициент соосаждения) не зависит ни от вида растений, ни от концентрации кальция в воде и равняется в среднем 0,3.

Изучение судьбы радиоактивных элементов попадающих тем или иным путем в природные водоемы, является особенно важным для понимания процессов естественной биологической очистки промышленных и сточных вод от радиоактивных загрязнений. Для этого необходимо знать распределение их по трем основным компонентам водоема: вода, грунт, биомасса. Изучение процентного распределения 20 различных радиоизотопов по основным компонентам водоема (вода, грунт, биомасса) позволило все изученные элементы разбить на четыре типа: гидротропы (более 80% радиоизотопа остается в воде), эквитропы (во всех трех компонентах содержится примерно одинаковое количество радиоизотопа), педотропы (более 50% концентрируется в грунте) и биотропы (более 50% концентрируются в биомассе). Как показали результаты опытов с радиостронцием, он относится к эквитропам, но при очень высоком содержании кальция и магния в воде он переходит в группу гидротропов (табл. 7).

Таблица 7

Распределение радиостронция по основным компонентам водоема в зависимости от концентрации кальция в воде
(в процентах от общей найденной радиоактивности)

Концентрация кальция в воде, *мг/л*	Биомасса	Грунт	Вода
1	30	25	17	58
2	80	17	9	74

3. Поведение радиостронция в системе «почва — растение».

В этой главе приводятся результаты опытов по изучению на-

копления радиостронция и относительного выноса его из почв некоторыми видами наземных растений, влияния общей концентрации стабильного стронция и суммы обменных катионов (кальций, магний) в почве на поступление радиостронция в растения.

Таблица 8

Накопление радиостронция наземными растениями

Вид	Количество радиостронция в *имп/мин* на *г* сухого вещества			Коэффициент накопления
	корни	надземная масса	почва	
Редис	4540	39000	12000	3,2
Редька	5600	50000	10800	4,6
Свекла	6700	35200	11000	3,2
Морковь	4800	18800	11500	1,6
Петрушка	5800	17000	11500	1,5
Огурцы	6500	50000	9600	5,2
Картофель	415	14000	9300	1,5
Горох	515	28600	11500	2,4
Лук	9500	13000	11500	1,1
Чеснок	11500	6000	12300	0,6
Ячмень	2000	7000	12000	0,6

В таблице 8 приводятся данные по накоплению радиостронция 11 видами наземных растений. У всех видов, кроме лилейных (лук, чеснок), концентрация радиостронция в надземной массе выше, чем в корнях. По содержанию радиостронция на единицу сухого веса надземной массы все изученные виды в этих опытах можно расположить в следующий ряд: огурцы > редька > > свекла > горох > морковь-петрушка > картофель > лук > > чеснок > ячмень. Коэффициенты накопления радиостронция надземной массой у изученных видов варьируют от 0,6 (лук, чеснок, ячмень) до 5 (огурцы, редис, редька).

Относительно коэффициентов накопления радиостронция наземными растениями необходимо отметить следующее. У наземных растений, в связи со значительной сорбционной способностью почв, а также с тем, что минеральные вещества усваиваются растениями, в основном, из почвенных растворов, коэффициенты накопления, вычисленные на основании общей концентрации данного элемента в почве (а не в почвенном растворе), не отражают истинного соотношения концентраций в организме и трофической среде и всегда резко занижены. Однако и такие

коэффициенты накопления надземной массой растений представляют значительный интерес, показывая относительную интенсивность выноса на дневную поверхность того или иного радиоизотопа разными видами. Вынос радиостронция с растительным покровом, при прочих равных условиях, понижается с увеличением суммы обменных катионов в почве. Добавление в почву небольших количеств стабильного стронция (от 22 до 2220 *мг/кг* почвы) практически не влияет на поступление радиостронция в растения. Это хорошо согласуется с результатами дополнительных опытов, проведенных по десорбции радиостронция из почвы, в которую добавлялся стабильный стронций. Процент радиостронция, переходящего в раствор из почвы, не зависел от дозы добавленного стабильного стронция и лишь незначительно повышался при самой высокой дозе (2200 *мг/кг*).

4. Изучение поведения радиостронция в природных наземных биогеоценозах.

На основании опытов, проведенных в лабораторных условиях по изучению поведения радиоизотопов в системе «раствор—почва», еще нельзя говорить о поведении их в природных условиях, где непрерывно происходят биохимические процессы, в результате которых могут образовываться, например, свободные органические кислоты. Присутствие этих кислот в почвенном растворе может изменить форму связи элемента с почвой, что повлечет за собой изменение его миграционных свойств. Учитывая все это, представляло интерес изучить поведение радиостронция в почве в природных условиях, и получить некоторое представление о скорости перераспределения его в биогеоценозе. С этой целью были поставлены опыты в модельных (опыты в ящиках) и естественных биогеоценозах (опыты на площадках).

Результаты этих опытов сводятся к следующему. Радиостронций, как и следовало ожидать исходя из данных лабораторных опытов, оказался довольно подвижным элементом; он промигрировал в почве как с растительным, так и без растительного покрова на некоторое расстояние от места внесения (опыты в ящиках). Это свидетельствует о том, что в распределении радиостронция в почвах большую роль играют ионообменные реакции. Интенсивность перераспределения радиостронция сильно зависела от видового состава растительного покрова. Так, например, концентрация радиостронция в почве, взятой на расстоянии 10 *см* от «загрязненного» слоя, под клевером была 1800 *имп/мин* на единицу веса, а под ячменем и в контроле (т. е. без растительного покрова) 500 *имп/мин*. Концентрация в клевере была 3200 *имп/мин*, а в ячмене 110 *имп/мин*. Зависимость в перерас-

пределении радиостронция в биогеоценозе от видового состава должна особенно сказываться при отмирании растительного покрова и отложении его в верхнем слое почвы.

В условиях залежного биогеоценоза Южного Урала радиостронций, внесенный в небольшую лунку в центре опытных площадок (2 площадки), за 3 года промигрировал как в вертикальном, так и в горизонтальном направлениях. В растительном покрове радиостронций прослеживался на расстоянии 50—60 *см* в окружности от места внесения.

В почве под местом внесения он прослеживался на глубине 25—30 *см*, а с удалением от места внесения глубина распространения радиостронция уменьшалась и на расстоянии 60 *см* равнялась 2—3 *см*. Концентрация радиостронция в растениях и, особенно, в почве резко падала к периферии, начиная уже с расстояния 10 *см* от места внесения. Результаты аналогичного опыта, проведенного на двух площадках в полупустынных горных условиях Таджикистана, показали, что радиостронций за один вегетационный сезон промигрировал от места внесения в окружности дальше, чем на 70 *см*. В непосредственной близости от места внесения оставался меньший процент от внесенного количества радиостронция по сравнению с уральской площадкой. При этом падение концентрации в растениях и почве по мере удаления от места внесения было менее резким.

В таблице 9 для наглядности сравнения интенсивности миграции радиостронция в условиях Южного Урала и Таджикистана содержание радиостронция в почве и растениях, взятых на разных расстояниях от места внесения, выражено в процентах от общей суммы его содержания во всех этих точках. Этот способ выражения удобно и наглядно позволяет представить

Таблица 9

Перераспределение радиостронция в биогеоценозах Южного Урала и Таджикистана

Таджикистан (4 месяца)			Южный Урал ($2^1/_2$ года)		
расстояние от места внесения (*см*)	содержание радиостронция в % от общего		расстояние от места внесения (*см*)	содержание радиостронция в % от общего	
	почва	растения		почва	растения
10—15	71	60	10—15	98	83
25—30	16	23	25—30	1,6	6,3
35—40	9	9	30—40	0,3	3,8
50—60	4	8,3	5—60	0,03	1,3
—	—	—	10—70	0	0

скорость убывания концентрации радиостронция по мере удаления от места внесения. Таким образом, результаты этих опытов показали весьма заметное повышение горизонтальной миграции радиостронция в почве и растительном покрове в условиях полупустынного ландшафта по сравнению с Уралом.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Результаты опытов с почвами показали, что радиостронций поглощается почвами в основном в результате ионообменных реакций и легко может быть вытеснен с них другими катионами. В связи с этим радиостронций должен поглощаться любыми почвами, так как емкость поглощения различных типов почв достаточно велика для поглощения микроколичеств радиостронция. При этом на поведение радиостронция в почвах (сорбция, десорбция) содержание стабильного стронция в них не должно влиять, так как обычно он находится в почвах в основном в необменной форме и в небольших количествах.

Как показано многочисленными опытами Гедройца, реакция между катионами почвы и раствора происходит мгновенно. В природных же условиях следует ожидать течение этой реакции со временем, где может иметь место и медленная диффузия ионов, которая в свою очередь будет сильно зависеть от температуры. Кроме того, при малом соотношении раствора к почве могут иметь место и другие реакции. Таким образом, при длительном контакте элемента с почвой формы связи его с ней со временем могут измениться.

Как показали данные наших опытов, радиостронций, который находился в почве около трех лет, из подвижной (обменной) формы частично перешел в неподвижную (необменную) форму. Известно, что наиболее существенным фактором, определяющим поведение многих химических элементов в почвах, является органическое вещество (гумус), которое способно давать с элементами комплексные растворимые или нерастворимые соединения, в результате чего меняется их миграционная способность. Как показали результаты наших опытов, содержание гумуса в почве не имеет прямого влияния на поглощение радиостронция почвами, и распределение радиостронция между почвой и раствором определяется количественным отношением обменных катионов, присутствующих в системе «почва — раствор».

Таким образом, проведенные лабораторные опыты по изучению поведения радиостронция в системе «почва — раствор» дают некоторое представление о поведении радиостронция в при-

родных условиях. При попадании в почву радиостронций будет поглощаться любыми почвами. Степень сорбции радиостронция будет тем больше, чем больше обменных катионов в почве и чем меньше их в поступающих растворах. Для десорбции должна быть справедлива обратная зависимость. Следовательно, в результате ионообменных реакций (поглощение — вытеснение), происходящих между катионами раствора и почвенного поглощающего комплекса, радиостронций будет распределяться между почвой и раствором в зависимости от количественных отношений катионов в системе «раствор — почва» и мигрировать как в вертикальном, так и горизонтальном направлениях. Это хорошо подтвердилось данными, полученными при изучении поведения радиостронция в природных условиях (опыты в ящиках и на площадках). Не менее важным фактором в перераспределении радиостронция в почве является растительный покров. Известно, что доступность химических элементов для растений определяется формой нахождения их в почве.

Так как радиостронций находится в почве в основном в подвижной форме, то он всегда присутствует в почвенном растворе и поэтому доступен для растений. Количество радиостронция, накапливаемого растениями, зависит от суммы обменных катионов в почве. Чем меньше катионов в почве, тем больше радиостронция поступает в растения. Вынос радиостронция на дневную поверхность будет в большой степени зависеть от видового состава фитоценоза, так как отдельные виды растений обладают неодинаковой способностью накапливать его из почв.

Данные, полученные по изучению накопления радиостронция пресноводными организмами, относящимися к различным систематическим группам, показали, что радиостронций накапливается организмами сравнительно в небольших количествах (полученные коэффициенты накопления порядка сотен). Низкие коэффициенты накопления радиостронция, даже у кальцефильных организмов (моллюски, хара), можно объяснить прежде всего механизмом его поглощения. Исходя из результатов опытов по динамике накопления радиостронция организмами (растения, моллюски) и последующей десорбции с них, накопление радиостронция происходит по крайней мере в результате двух различных процессов: обратимого и необратимого. Первый процесс (обратимый) происходит, возможно, за счет поверхностной сорбции. При этом динамическое равновесие радиостронция (при сорбции и десорбции) между организмом и средой устанавливается в течение первых двух суток. Количество радиостронция, переходящего в организм, зависит от концентрации катио-

3. Накопление радиостронция из почвы наземными растениями зависит от вида растений. Коэффициенты накопления для разных видов варьируют от 0,6 до 5 и тем выше, чем меньше сумма обменных катионов в почве. В большинстве растений радиостронций концентрируется в надземной—массе; в связи с этим виды с относительно высоким коэффициентом накопления радиостронция в заметном количестве выносят его на дневную поверхность и с отмирающей массой переоткладывают его в верхний слой почвы. Содержание стабильного стронция, который вносился в почву, не влияло на поступление радиостронция в растения.

4. Получено, что горизонтальная и вертикальная миграция радиостронция в почвах протекает интенсивнее (благодаря ионному обмену), чем для большинства других радиоизотопов. Большую роль в перераспределении радиостронция в почвах играет растительный покров. В различных природных биогеоценозах, резко отличающихся друг от друга по почвам, растительному покрову и условиям географической среды, интенсивность миграции радиостронция от места внесения может заметно отличаться.

5. Большая подвижность радиостронция в отдельных участках биосферы, в отличие от других радиоизотопов, обусловлена, в основном обменной формой нахождения его в почвах, водоемах и живых организмах.

СПИСОК

работ, опубликованных по материалам диссертации

1. Титлянова А. А. и Тимофеева. Н. А. О подвижности соединений кобальта, стронция и цезия в почве. «Почвоведение» № 3, 1959.

2. Тимофеева Н. А. и Титлянова А. А. Сорбция микроколичеств химических элементов почвой. Тр. Урал. отд. МОИП, № 2, 1959.

3. Тимофеева Н. А. и Титлянова А. А. Сорбция стронция^{90} почвами. Известия АН СССР, № 1, 1959.

4. Тимофеева Н. А. К вопросу о миграции радиостронция в биогеоценозах. ДАН, том 133, № 2, 1960.

5. Титлянова А. А. и Тимофеева Н. А. Сорбция радиоактивных изотопов почвой. Сб. работ лаб. биофизики. IV, Свердловск, 1962.

6. Тимофеева Н. А. Накопление радиостронция пресноводными растениями при разных концентрациях кальция в воде. Сб. лаб. биофизики, № 7, Тр. Ин-та биологии (в печати).

7. Тимофеева Н. А. и Агре А. А. Коэффициенты накопления стронция^{90} пресноводными растениями из растворов разной концентрации. Радиобиология (в печати).

НС 35519 7/VIII 1964 г. Тираж 200. Заказ № 612

Типография изд-ва «Уральский рабочий»,
г. Свердловск, проспект им. Ленина, 49.