АКАДЕМИЯ НАУК СССР
УРАЛЬСКИЙ НАУЧНЫЙ ЦЕНТР

РАДИОЭКОЛОГИЧЕСКИЕ ИССЛЕДОВАНИЯ ПОЧВ И РАСТЕНИЙ

1975
ВЫП. 95

АКАДЕМИЯ НАУК СССР · УРАЛЬСКИЙ НАУЧНЫЙ ЦЕНТР
ТРУДЫ ИНСТИТУТА ЭКОЛОГИИ РАСТЕНИЙ И ЖИВОТНЫХ

РАДИОЭКОЛОГИЧЕСКИЕ ИССЛЕДОВАНИЯ ПОЧВ И РАСТЕНИЙ

СВЕРДЛОВСК

УДК 577.41/46 : 577.391

Радиоэкологические исследования почв и растений. Сб. статей. Свердловск, 1975 (УНЦ АН СССР).

В сборник включены экспериментальные работы сотрудников лаборатории радиационной биоценологии и биофизики Института экологии растений и животных Уральского научного центра АН СССР, выполненные в течение 1968—1973 гг.

В нем рассматриваются вопросы подвижности и распределения радиоактивных изотопов (стронция-90, цезия-137, церия-144 и др.) в системе почва — раствор в зависимости от режима почвенного увлажнения, типа почв, присутствия в среде водорастворимых веществ из разлагающегося растительного опада. Излагаются результаты многолетних экспериментов по изучению миграции радиоизотопов в почвах естественных биогеоценозов. Приведены данные о поступлении радиоизотопов из почвы в растения в зависимости от ряда сопутствующих факторов. Обсуждаются результаты опытов по биологическому действию на растительный организм инкорпорированных и внешних источников ионизирующего излучения.

Сборник представляет интерес для широкого круга специалистов в соответствующих областях радиобиологии, экологии, биогеоценологии, радиационной гигиены, почвоведения и агрохимии.

Ответственный редактор *Н. В. Куликов*

© УНЦ АН СССР, 1975.

1975 АКАДЕМИЯ НАУК СССР · УРАЛЬСКИЙ НАУЧНЫЙ ЦЕНТР
РАДИОЭКОЛОГИЧЕСКИЕ ИССЛЕДОВАНИЯ ПОЧВ И РАСТЕНИЙ

Е. Н. КАРАВАЕВА, И. В. МОЛЧАНОВА, Н. В. КУЛИКОВ

ВЛИЯНИЕ ВЛАЖНОСТИ ПОЧВЫ НА ПОВЕДЕНИЕ СТРОНЦИЯ-90, ЦЕЗИЯ-137 И ЦЕРИЯ-144 В СИСТЕМЕ ПОЧВА — РАСТВОР

Миграция радиоактивных изотопов в почве происходит несколькими путями, один из которых — перемещение с водными растворами. Большинство экспериментальных работ по изучению поведения радиоизотопов в системе почва — раствор проводится с почвенными суспензиями, т. е. в условиях, когда количество раствора в системе значительно превышает количество твердой фазы (Кокотов и др., 1961; Тимофеев-Ресовский и др., 1966; Молчанова, Куликов, 1972). Результаты таких исследований способствуют пониманию первичных физико-химических механизмов, лежащих в основе процессов миграции микроколичеств химических элементов в почвах с почвенными растворами и поступления их в растения через корневую систему. Вместе с тем в последние годы появляются данные, свидетельствующие о том, что количественные параметры перехода некоторых радиоизотопов в раствор во влажных почвах существенно иные, чем в почвенных суспензиях (Прохоров, Фрид, 1969; Фрид, Прохоров, 1969; Молчанова, Караваева, 1971; Молчанова и др., 1972).

В естественной обстановке влажность почв варьирует в довольно широких пределах, что связано прежде всего с метеорологическими условиями и сезонными явлениями. Как отмечает ряд исследователей, водный фактор может оказать значительное влияние на передвижение и перераспределение радиоизотопов в почвах (Алексахин, 1963; Писарев и др., 1972; Menzel, 1960).

В настоящей работе излагаются результаты опытов по сравнительному изучению распределения в системе почва — раствор стронция-90, цезия-137 и церия-144 при изменении в широких пределах соотношения твердой и жидкой фаз.

МЕТОДИКА ПРОВЕДЕНИЯ ОПЫТОВ

Опыты проводились на трех почвах, принадлежащих к разным почвенно-географическим зонам: дерново-луговой, горизонт А (Южный Урал, Ильменский заповедник), дерново-подзолистой, горизонт A_2 (Средний Урал, Свердловская область) и торфянисто-глеевой, горизонт B_g (лесотундра Зауралья, стационар «Харп»). В табл. 1 приведена краткая физико-химическая характеристика почв.

В опытах использовали смесь почвы с кварцевым песком. Дерново-луговую и торфянисто-глеевую почвы смешивали с песком в соотношении 1 : 1, а дерново-подзолистую — в соотношении 2 : 1 по объему. В почвенную смесь вносили путем фракционированного полива и последующего перемешивания растворы хлористых соединений стронция-90, цезия-137 и церия-144 без добавления носителей. Концентрация радиоизотопов в воздушно-сухой почве приведена в табл. 2.

Воздушно-сухую почву, содержащую радиоизотоп, увлажняли так, что отношение объема воды (*мл*) к весу почвы (*г*) составляло в зависимости от варианта опыта 0,1; 0,2; 0,3; 0,5; 1,0; 2,0; 5,0; 10,0 и 20,0. Эти значения в дальнейшем будем называть коэффициентами обводненности почвы.

Навески влажной почвы (коэффициент обводненности менее единицы) в плотно закрытых бюксах помещали на 10—20 дней в эксикаторы с водой, а почвенные суспензии (коэффициент обводненности больше единицы) взбалтывали в течение двух часов в закрытых стаканчиках из оргстекла. Как показали специальные опыты, за такое время достигалось равновесное рас-

Таблица 1

Физико-химическая характеристика почв

Почва	Гигроскопическая влага, %	Гумус, %	Обменные основания, *мг·экв*/100 *г*		pH		Содержание гранулометрических фракций, % на абсолютно сухую навеску	
			Ca^{++}	Mg^{++}	водный	солевой	<0,001 *мм*	<0,01 *мм*
Дерново-луговая, гор. А . .	4,48	12,20	40,00	12,00	6,8	5,5	22,37	39,77
Дерново-подзолистая*, гор. A_2	1,10	0,70	3,30	1,40	5,7	4,6	3,30	23,10
Торфянисто-глеевая, гор. B_g	2,36	1,03	4,40	5,00	4,7	3,8	14,12	24,80

* Данные взяты из работы В. П. Фирсовой и Г. К. Ржанниковой (Фирсова, Ржанникова, 1966).

пределение изучаемых радиоизотопов между жидкой и твердой фазами почвы при всех принятых нами режимах увлажнения. По достижении равновесного распределения радиоизотопов в системе почва — раствор почвенные навески из всех вариантов опыта подвергались центрифугированию при скорости 5000 *об/мин* на центрифуге типа ЦЛС-3. При этом влажную почву центрифугировали в пробирках с перфорированным дном. Все опыты были проведены в шести повторностях.

Таблица 2

Концентрация радиоизотопов, *мккюри/кг*

Почва	Стронций-90	Цезий-137	Церий-144
Дерново-луговая	650	500	1810
Дерново-подзолистая	580	410	1640
Торфянисто-глеевая	1550	600	2140

Содержание радионуклидов в растворе определяли на радиометре типа УМФ-1500 со счетной трубкой СБТ-13 при статистической ошибке счета 3—5%.

Об адсорбционной способности почвы судили по величине коэффициента распределения, который определялся как отношение концентрации радиоизотопа в почве к концентрации его в равновесном растворе.

РЕЗУЛЬТАТЫ ОПЫТОВ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Влияние режима почвенного увлажнения на характер распределения стронция-90, цезия-137 и церия-144 в системе почва — раствор

Из рис. 1 видно, что концентрация радионуклида в растворе закономерно снижается с увеличением жидкой фазы, а коэффициенты распределения соответственно возрастают. При увеличении коэффициента обводненности в 200 раз концентрация стронция-90 в растворе снижается лишь в десять раз. Следовательно, характер изменения концентрации стронция в растворе нельзя объяснить простым разбавлением исходного количества растворимой формы радионуклида. Как будет показа-

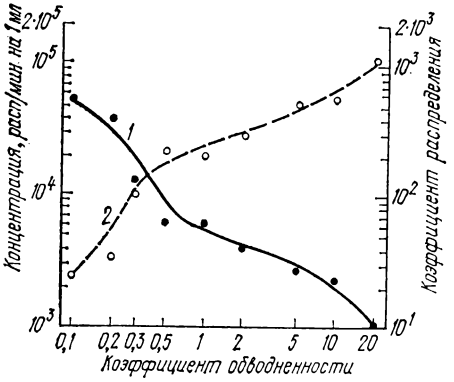


Рис. 1. Концентрация в растворе (*1*) и коэффициенты распределения (*2*) стронция-90 в зависимости от обводненности дерново-луговой почвы.

Таблица 3

Концентрация в растворе (*расп/мин* на 1 *мл*) и коэффициенты распределения (к.р.) стронция-90 в зависимости от обводненности почв

Коэффициент обводненности почвы	Почва			
	дерново-подзолистая		торфянисто-глеевая	
	концентрация	к.р.	концентрация	к.р.
0,1	159 500	8±1	48 030	71±2
0,2	51 040	25±1	23 680	144±5
0,3	37 530	34±1	22 290	153±21
0,5	36 460	35±2	34 100	100±1
1,0	26 580	48±1	31 285	109±2
2,0	25 520	50±1	26 030	131±3
5,0	17 720	72±8	11 640	293±8
10,0	14 180	90±2	6090	560±18
20,0	7290	175±11	4000	852±24

но далее, с увеличением содержания воды в изучаемой системе общее количество растворенного стронция в водной фазе возрастает за счет дополнительного поступления его из почвы.

Аналогичный характер распределения стронция-90 в системе почва — раствор в зависимости от соотношения жидкой и твер-

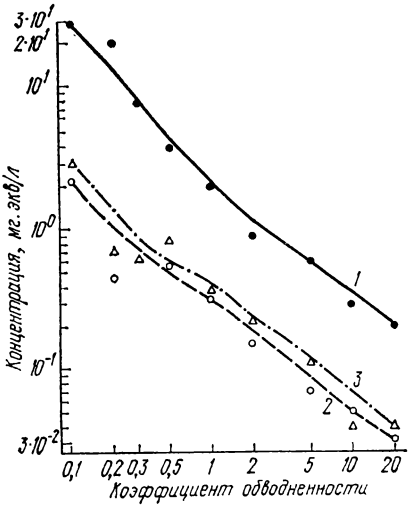


Рис. 2. Концентрация кальция в растворе в зависимости от обводненности почв.

1 — дерново-луговая, *2* — дерново-подзолистая, *3* — торфянисто-глеевая.

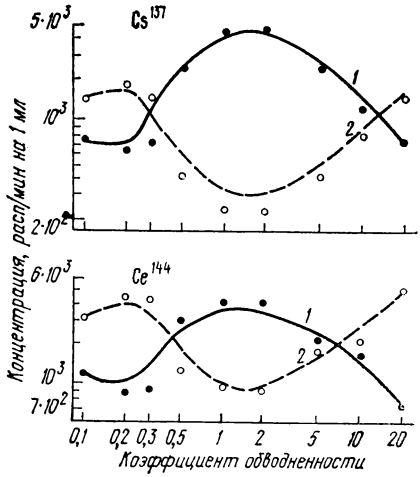


Рис. 3. Концентрация в растворе (*1*) и коэффициенты распределения (*2*) цезия-137 и церия-144 в зависимости от обводненности дерново-луговой почвы.

дой фаз установлен также для дерново-подзолистой и торфянисто-глеевой почв (табл. 3).

Наряду со стронцием-90, определяли в растворе содержание стабильного изотопа кальция. Как и следовало ожидать, изменение концентрации кальция в растворе при разных соотношениях жидкой и твердой фаз почвы подчиняется в общем виде той же зависимости, что и изменение концентрации стронция-90 (рис. 2). При слабом увлажнении изученных почв концентрация кальция в растворе относительно высокая, а с увеличением обводненности она заметно снижается. Являясь химическим макроаналогом стронция-90, кальций может способствовать вытеснению этого радионуклида из твердой фазы почвы в жидкую.

Таблица 4

Концентрация в растворе (*расп/мин* на 1 *мл*) и коэффициенты распределения радиоизотопов в зависимости от обводненности дерново-подзолистой почвы

Коэффициент обводненности почвы	Цезий-137		Церий-144	
	концентрация	к.р.	концентрация	к.р.
0,1	1480	654±60	6340	569±100
0,2	1490	650±75	5485	658±70
0,3	1265	765±80	7455	484±48
0,5	3460	280±28	13120	275±13
1,0	3640	266±30	11100	325±15
2,0	5830	166±10	20980	172±8
5,0	2890	335±15	11345	318±15
10,0	2370	409±25	7610	474±20
20,0	1445	670±60	3455	1045±50

В отличие от стронция-90 и кальция, распределение цезия-137 и церия-144 в системе почва — раствор носит более сложный характер. При относительно малом содержании влаги в почве (коэффициент обводненности от 0,1 до 0,3) концентрация цезия и церия в растворе изменяется незначительно (рис. 3). При более высоком увлажнении, на границе перехода от влажной почвы к почвенной суспензии (коэффициент обводненности от 0,5 до 2,0), концентрация обоих радиоизотопов в растворе возрастает, а с дальнейшим увеличением обводненности почвы снова снижается почти по кривой разбавления. В соответствии с изменением концентрации излучателей в растворе изменяются и коэффициенты распределения.

Таблица 5

Концентрация в растворе (*расп/мин* на 1 *мл*) и коэффициенты распределения радиоизотопов в зависимости от обводненности торфянисто-глеевой почвы

Коэффициент обводненности почвы	Цезий-137		Церий-144	
	концентрация	к.р.	концентрация	к.р.
0,1	415	3195±380	1080	4360±920
0,2	640	2070±162	883	5330±1200
0,3	1590	832∓46	2890	1630∓292
0,5	3160	418±14	3830	1230±92
1,0	8860	149±10	3315	1420±88
2,0	11090	119±6	6405	735±87
5,0	4800	275±18	4530	1040±88
10,0	2292	576±27	3160	1490±194
20,0	1740	758±28	1725	2730±178

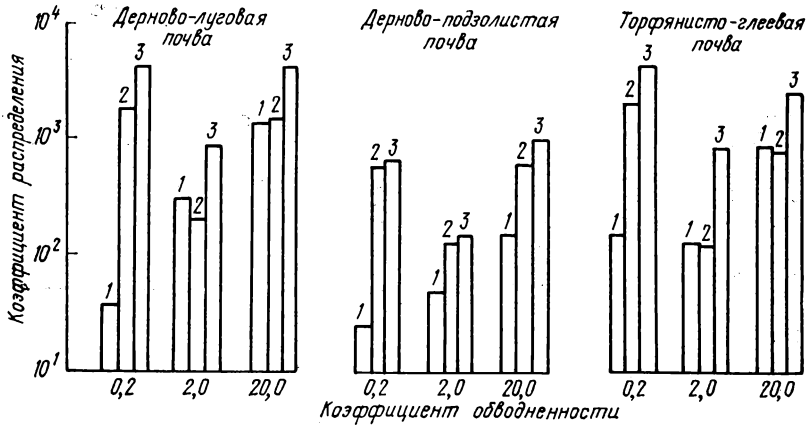


Рис. 4. Коэффициенты распределения радиоизотопов в зависимости от обводненности почв.

1 — стронций-90, *2* — цезий-137, *3* — церий-144.

Аналогичные результаты получены в серии опытов с дерново-подзолистой и торфянисто-глеевой почвами (табл. 4, 5). Можно отметить, однако, что уменьшение коэффициентов обводненности торфянисто-глеевой почвы от 0,3 до 0,1 приводит к некоторому снижению концентрации цезия-137 и церия-144 в почвенном растворе (табл. 5).

На рис. 4 приведены значения коэффициентов распределения всех трех изучавшихся радиоизотопов во влажной почве, при переходе ее к почвенной суспензии и в разбавленной суспензии, характеризующихся коэффициентами обводненности 0,2; 2,0 и 20,0 соответственно. Коэффициенты распределения Sr во влажной почве примерно в 15—50 раз (в зависимости от типа почвы) ниже коэффициентов распределения цезия и в 30—100 раз ниже таковых церия. Следовательно, во влажной почве подвижность изучаемых радиоизотопов изменяется в ряду: $Sr \gg Cs > Ce$.

При переходе к почвенной суспензии коэффициент распределения стронция либо возрастает (дерново-луговая и дерново-подзолистая почвы), либо остается таким же (торфянисто-глеевая почва), а коэффициенты распределения цезия и церия во всех случаях соответственно уменьшаются. В результате цезий по подвижности приближается к стронцию или оказывается относительно более подвижным, чем стронций. Подвижность церия также заметно увеличивается.

В сильно разбавленной почвенной суспензии (коэффициент обводненности 20) коэффициент распределения стронция еще более возрастает, при этом коэффициенты распределения цезия и церия достигают примерно тех же значений, что и во влажной почве. В такой системе относительная подвижность стронция

и цезия более или менее (в зависимости от типа почвы) выравнивается, а подвижность церия и в этом случае остается самой низкой.

Из рис. 4 также следует, что коэффициенты распределения радиоизотопов изменяются в ряду почв: дерново-луговая $\geqslant$ торфянисто-глеевая $>$ дерново-подзолистая. Следовательно, в данной последовательности уменьшается адсорбционная способность почв по отношению к изученным элементам.

Рассмотренный материал показывает, что величина коэффициента распределения отражает относительную подвижность радиоизотопов лишь в условиях одинаковой увлажненности почвы. При разных режимах почвенного увлажнения подвижность радиоизотопов в системе почва — раствор целесообразно выражать величиной той части общего содержания радионуклида в почве, которая удерживается в растворе. В конечном счете только растворенная часть излучателя способна с наибольшей вероятностью мигрировать за пределы первично загрязненного слоя почвы; она же в первую очередь поглощается корневыми системами растений.

ВЛИЯНИЕ РЕЖИМА ПОЧВЕННОГО УВЛАЖНЕНИЯ НА ОБЩЕЕ СОДЕРЖАНИЕ РАДИОИЗОТОПОВ В РАСТВОРЕ

Как видно из табл. 6, общее количество радиоизотопов в растворе в значительной степени зависит от увлажнения почв, причем у разных радиоизотопов эта зависимость проявляется по-разному. Так, содержание стронция-90 в растворе несколько увеличивается при образовании почвенной суспензии (коэффициент обводненности от 1,0 до 10,0). Дальнейшее увеличение водной фазы не приводит к заметному изменению содержания

Таблица 6

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

Коэффициент обводненности почв	Почва								
	дерново-луговая			дерново-подзолистая			торфянисто-глеевая		
	Sr^{90}	Cs^{137}	Ce^{144}	Sr^{90}	Cs^{137}	Ce^{144}	Sr^{90}	Cs^{137}	Ce^{144}
0,1	0,40	0,007	0,003	1,2	0,02	0,02	0,1	0,003	0,002
0,2	0,50	0,011	0,004	0,8	0,03	0,03	0,1	0,009	0,004
0,3	0,30	0,020	0,007	0,9	0,04	0,06	0,2	0,040	0,020
0,5	0,20	0,130	0,040	1,4	0,18	0,18	0,5	0,100	0,040
1,0	0,40	0,430	0,100	2,1	0,38	0,30	0,9	0,600	0,070
2,0	0,60	0,910	0,220	4,0	1,20	1,10	1,5	1,600	0,300
5,0	1,00	1,250	0,280	7,0	1,50	1,55	1,7	1,800	0,500
10,0	1,70	1,250	0,450	11,1	2,50	2,08	1,8	1,700	0,700
20,0	1,40	1,370	0,400	11,4	3,00	1,88	2,3	2,600	0,700

радионуклида в растворе, хотя, как было показано выше, коэффициенты распределения стронция с увеличением обводненности почвы непрерывно возрастают.

В отличие от стронция, содержание цезия в растворе увеличивается почти пропорционально степени обводненности почв вплоть до образования суспензии (в пределах коэффициентов обводненности от 0,1 до 2,0). Дальнейшее увлажнение в значительно меньшей мере изменяет общее содержание цезия в растворе. При самых крайних значениях обводненности почв суммарное количество радиоизотопа в растворе отличается на порядки величин. Аналогичная картина наблюдается при рассмотрении данных по церию, который при всех режимах увлажнения дерново-луговой и торфянисто-глеевой почвы переходит в раствор в меньшем количестве, чем цезий. В дерново-подзолистой почве цезий и церий имеют примерно одинаковую подвижность.

При сравнительно низких уровнях увлажнения почвы (коэффициент обводненности менее единицы) стронция содержится в растворе на один-два порядка величин больше, чем цезия и церия; при высоких же значениях коэффициентов обводненности относительное содержание этих радиоизотопов более или менее выравнивается, а в отдельных случаях цезия переходит в раствор даже больше, чем стронция. Следовательно, при сильном переувлажнении почв цезий и церий по подвижности приближаются к стронцию. В отдельных случаях цезий оказывается даже более подвижным, чем стронций. При малых увлажнениях, наоборот, стронций проявляет значительно бо́льшую подвижность по сравнению с цезием и церием.

Учитывая относительно высокую подвижность стронция-90 в системе почва — раствор при малой степени обводненности почвы, можно было ожидать, что в природных почвах стронций проявит себя более мобильным, чем цезий-137 и церий-144. Однако имеющиеся в литературе данные показывают, что параметры вертикальной миграции этих радиоизотопов часто оказываются весьма близкими (Махонина и др., 1965; Махонько, Чумичев, 1969; Куликов, Пискунов, 1970). Полученные в нашей работе результаты показывают, что выравнивание темпов вертикальной миграции радионуклидов в почвах может происходить под влиянием временного переувлажнения почв, связанного с сезонными явлениями в природе.

Выводы

1. С изменением коэффициента обводненности изученных почв от 0,1 до 20,0 концентрация стронция-90 в растворе закономерно снижается, а коэффициенты распределения соответственно возрастают.

Распределение цезия-137 и церия-144 в системе почва — рас-

твор подчиняется более сложной зависимости. Концентрация этих радиоизотопов в растворе имеет максимальную величину, а коэффициенты распределения достигают минимальных значений при переходе от влажных почв к почвенным суспензиям (коэффициенты обводненности 1—2). При самых крайних режимах почвенного увлажнения коэффициенты распределения цезия и церия, как правило, характеризуются одинаковыми величинами.

2. В пределах коэффициентов обводненности почв от 0,1 до 20,0 суммарное количество стронция-90 в растворе возрастает от четырех до двадцати раз, а цезия-137 и церия-144 — на два порядка величин.

Во влажных почвах (коэффициент обводненности менее единицы) относительная подвижность радиоизотопов в системе почва — раствор изменяется в ряду: $Sr^{90} \gg Cs^{137} > Ce^{144}$. В почвенных суспензиях (коэффициент обводненности больше единицы) подвижность радионуклидов более или менее выравнивается.

3. Анализ полученных данных дает основание предполагать, что сезонные перепады почвенного увлажнения являются одной из причин нивелирования темпов вертикальной миграции изучавшихся радионуклидов в почвах естественных биогеоценозов.

ЛИТЕРАТУРА

Алексахин Р. М. Радиоактивное загрязнение почвы и растений. М., Изд-во АН СССР, 1963.

Кокотов Ю. А., Попова Р. Ф., Урбанюк А. П. Сорбция долгоживущих продуктов деления почвами и глинными минералами.— Радиохимия, 1961, т. 3, вып. 2.

Куликов Н. В., Пискунов Л. И. О роли растений в вертикальной миграции стронция-90 и цезия-137 в почве.— Агрохимия, 1970, № 7.

Махонина Г. И., Молчанова И. В., Субботина Е. Н., Тимофеев-Ресовский Н. В., Титлянова А. А., Тюрюканов А. Н., Чеботина М. Я. Распределение Fe^{59}, Co^{60}, Sr^{90}, Ru^{106}, Cs^{137} и Ce^{144} по компонентам биогеоценоза.— Труды Ин-та биологии УФАН СССР, 1965, вып. 45.

Махонько К. П., Чумичев В. В. О проникновении некоторых продуктов деления в почву.— Радиоактивные изотопы в почвах и растениях. Сборник трудов по агрономич. физике, вып. 18. Л., «Колос», 1969.

Молчанова И. В., Караваева Е. Н. Распределение радиоизотопов в системе почва — почвенный раствор — растение в зависимости от влажности почвы.— Экология, 1971, № 1.

Молчанова И. В., Караваева Е. Н., Куликов Н. В. Влияние влажности почвы на поступление стронция-90 в растения.— Экология, 1972, № 3.

Молчанова И. В., Куликов Н. В. Радиоактивные изотопы в системе почва — растение. М., Атомиздат, 1972.

Писарев В. В., Колосков И. А., Кузнецов В. М., Цыбизов И. С. Вымывание стронция-90 из почвенного покрова поверхностными водами.— Почвоведение, 1972, № 3.

Прохоров В. М., Фрид А. С. Адсорбция стронция-90 влажными почвами.— Радиоактивные изотопы в почвах и растениях. Сборник трудов по агрономич. физике, вып. 18. Л., «Колос», 1969.

Тимофеев-Ресовский Н. В., Титлянова А. А., Тимофеева Н. А., Махонина Г. И., Молчанова И. В., Чеботина М. Я. Поведение радиоактивных изотопов в системе почва — раствор.— Радиоактивность почв и методы ее определения. М., «Наука», 1966.

Фирсова В. П., Ржанникова Г. К. Почвы Уралмашевского лесхоза Свердловской области.— Труды Ин-та биологии УФАН СССР, 1966, вып. 55.

Фрид А. С., Прохоров В. М. Об измерении коэффициентов распределения радиоизотопов во влажной почве.— Радиоактивные изотопы в почвах и растениях. Сборник трудов по агрономич. физике. вып. 18. Л., «Колос», 1969.

Menzel R. G. Soil runoff hing in strontium-90.— Crops a. Soils, 1960, vol. 12, N 4.

1975 | АКАДЕМИЯ НАУК СССР · УРАЛЬСКИЙ НАУЧНЫЙ ЦЕНТР
РАДИОЭКОЛОГИЧЕСКИЕ ИССЛЕДОВАНИЯ ПОЧВ И РАСТЕНИЙ

И. В. МОЛЧАНОВА, Е. Н. КАРАВАЕВА

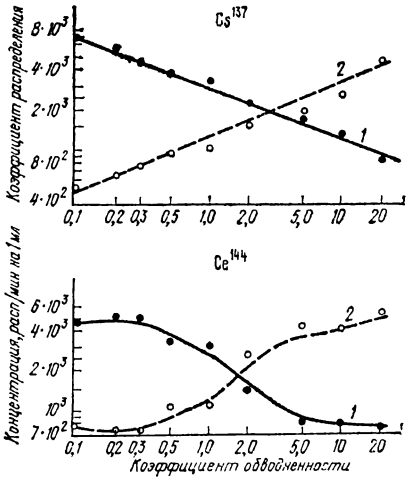
РОЛЬ ОРГАНИЧЕСКОГО ВЕЩЕСТВА И ПОЧВЕННОГО УВЛАЖНЕНИЯ В ПРОЦЕССЕ ПЕРЕХОДА ЦЕЗИЯ-137 И ЦЕРИЯ-144 ИЗ ПОЧВЫ В РАСТВОР

Ранее нами [1] было показано, что распределение цезия-137 и церия-144 в системе почва — раствор зависит от соотношения жидкой и твердой фаз. При этом отмечалось, что во влажных почвах концентрация обоих радиоизотопов в растворе изменяется незначительно, на границе перехода от влажных почв к почвенным суспензиям она возрастает, а при дальнейшем увеличении обводненности почвы снова постепенно снижается. В соответствии с изменением концентрации излучателей в растворе изменяются и коэффициенты распределения (см. статью Е. Н. Караваевой, И. В. Молчановой, Н. В. Куликова «Влияние влажности почвы на поведение стронция-90, цезия-137 и церия-144 в системе почва — раствор» в настоящем сборнике).

Предстояло выяснить, с чем связаны отмеченные особенности распределения цезия и церия в исследуемых системах. Измерение значений pH равновесных растворов показало, что при коэффициентах обводненности от 0,5 до 20,0 pH растворов постоянно и равно шести. В области коэффициентов обводненности от 0,1 до 0,3 почвенный раствор подкисляется (pH 4). Сопоставление коэффициентов распределения радиоизотопов с изменением величин pH показывает, что распределение излучателей между твердой и жидкой фазами носит более сложный характер и, следовательно, не может определяться лишь щелочно-кислотными условиями среды.

В процессе выполнения работы было замечено, что центрифугаты почвенных суспензий имели слабую коричневатую окраску. С уменьшением обводненности почвы интенсивность окраски нарастала и достигала максимума в растворах, выделенных из почвы при коэффициентах обводненности, равных 1

[1] Куликов Н. В., Молчанова И. В., Караваева Е. Н. Влияние режима почвенного увлажнения на переход стронция-90, цезия-137 и церия-144 из почвы в раствор.— Экология, 1973, № 4.



Концентрация в растворе (*1*) и коэффициенты распределения (*2*) цезия-137 и церия-144 в зависимости от обводненности почвы, лишенной органического вещества.

и 2. Такое окрашивание центрифугатов вызвано, по-видимому, растворением органического вещества почвы. Центрифугаты, выделенные из почв при коэффициентах их обводненности от 0,1 до 0,3, были бесцветными. Очевидно, кислая реакция почвенного раствора и высокая его солевая концентрация (различия в солевой концентрации растворов при крайних режимах увлажнения достигали двух порядков величин) снижают[2] растворимость органического вещества. Синхронность в изменении окраски растворов и концентрации в них цезия и церия дает основание полагать, что увеличение концентрации радиоизотопов в жидкой фазе происходит под действием водорастворимого органического вещества почвы.

Для проверки этого предположения были проведены опыты с дерново-луговой почвой, органическое вещество которой удалялось прокаливанием в муфеле при температуре 500° С. Прокаленную почву с внесенными в нее радиоизотопами (1,55 *мкюри/кг*) увлажняли дистиллированной водой так, что коэффициенты обводненности в разных вариантах опыта составляли 0,1; 0,2; 0,3; 0,5; 1,0; 2,0; 5,0; 10,0; 20,0. По достижении равновесного распределения радиоизотопов в системе почва — раствор навески почвы из всех вариантов опыта подвергали центрифугированию. В выделенном таким способом почвенном растворе определяли содержание радиоизотопов на радиометре типа УМФ-1500 со счетчиком СБТ-13 (при статистической ошибке счета 3—5%).

Как видно из рисунка, концентрация цезия-137 и церия-144 в растворе с увеличением обводненности почвы закономерно снижается, а коэффициенты распределения соответственно возрастают. Вместе с тем общее содержание радиоизотопов в жидкой фазе увеличивается по мере увеличения коэффициентов обводненности (см. таблицу). В области коэффициентов обводненности от 0,5 до 20,0 содержание радиоизотопов в жидкой фазе, выделенной из нативной почвы, выше, чем их содержание в жидкой фазе, выделенной из прокаленной почвы. При этих же

[2] Возбуцкая А. Е. Химия почвы. М., «Высшая школа», 1968.

Содержание радиоизотопов в растворе, % от внесенного в почву количества

Коэффициент обводненности	Цезий-137		Церий-144	
	Нативная почва	Почва, лишенная органического вещества	Нативная почва	Почва, лишенная органического вещества
0,1	0,007	0,020	0,003	0,020
0,2	0,011	0,030	0,004	0,030
0,3	0,020	0,040	0,007	0,040
0,5	0,130	0,050	0,040	0,040
1,0	0,430	0,100	0,100	0,090
2,0	0,910	0,130	0,220	0,070
5,0	1,250	0,260	0,280	0,120
10,0	1,250	0,400	0,450	0,250
20,0	1,370	0,480	0,400	0,450

величинах коэффициентов обводненности происходит растворение органического вещества нативной почвы и его переход в жидкую фазу. Во влажных почвах (коэффициенты обводненности 0,1—0,3), где перехода органического вещества в раствор не наблюдается, имеет место обратная зависимость: содержание радиоизотопов в жидкой фазе нативной почвы ниже такового в жидкой фазе, выделенной из прокаленной почвы. На основании полученных данных можно полагать, что органическое вещество, переходящее в раствор при высоких уровнях обводненности почвы, способствует увеличению подвижности цезия-137 и церия-144.

М. Я. ЧЕБОТИНА

ДЕСОРБЦИЯ ЖЕЛЕЗА-59, КОБАЛЬТА-60, СТРОНЦИЯ-90 ИЗ ПОЧВЫ РАСТИТЕЛЬНЫМИ ЭКСТРАКТАМИ В УСЛОВИЯХ ДИНАМИЧЕСКИХ ОПЫТОВ

Ранее нами (Чеботина, 1971) установлено, что в условиях динамических лабораторных опытов происходит снижение сорбции железа-59 и кобальта-60 в почве, если указанные радиоизотопы поступают в почвенную колонку вместе с водными экстрактами из листьев растений. В настоящем сообщении приводим данные по десорбции железа-59, кобальта-60 и стронция-90 растительными экстрактами из почвы, предварительно загрязненной этими радиоизотопами.

Стеклянные колонки диаметром 2 *см* и высотой 15 *см* заполнялись воздушно-сухой смесью почвы и песка при соотношении 1 : 1 по весу. Навеска смеси составляла 100 *г*, что соответствовало объему фильтра в колонке 45 *см*^{3}. Радиоактивность почвенной смеси была примерно 0,1 *мккюри/г*. Десорбирующие растворы через резиновые шланги подавались в колонки снизу вверх из бутылей, помещенных на расстоянии около 1 *м* над входом в колонку. Скорость фильтрации составляла примерно 0,2 *мл/мин*. Фильтрат, прошедший через почвенную колонку, собирали в мерные цилиндры, а количество его измеряли в объемах почвенного фильтра. Через каждые 3—4 объема отбирали пробы для измерения радиоактивности фильтрата. После окончания опыта почвенные фильтры слабо подсушивались и разделялись на

Таблица 1

Результаты химического анализа экстрактов, *мг/л*

Экстракт	Сухой остаток	C	Ca	Mg	K	Na
Из хвои сосны	3250	730	27	37	96	—
Из листьев липы	7900	3130	510	177	556	1,1
Из листьев осины	9750	3970	940	248	652	5,2

пять горизонтальных слоев. Почву каждого слоя доводили до воздушно-сухого состояния, тщательно перемешивали и из нее отбирали пробы (1 г) для радиометрического анализа. Содержание радиоизотопа в каждом слое выражалось в процентах от общего содержания его в почвенной колонке.

В качестве десорбирующих растворов в работе были использованы экстракты из хвои сосны, листьев липы и осины. Растительный материал собирали на территории Ильменского заповедника им. В. И. Ленина. Свежеопавшие листья осины и липы

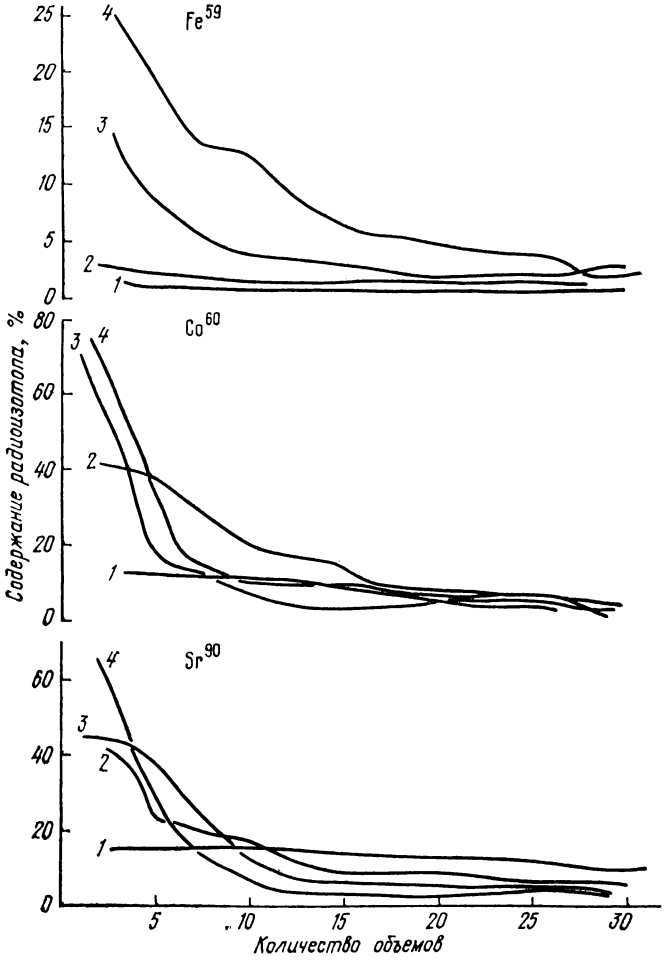


Рис. 1. Содержание железа-59, кобальта-60 и стронция-90 в фильтрате, вытекающем из колонок, в зависимости от количества объемов пропущенного раствора.

1 — вода (контрольная колонка); *2* — экстракт из хвои сосны; *3* — экстракт из листьев липы; *4* — экстракт из листьев осины.

собирались в сентябре. Пожелтевшую отмершую хвою сосны срывали с дерева в течение лета. Растительные экстракты готовили путем 10-дневного настаивания 100 *г* воздушно-сухих листьев на 1250 *мл* отфильтрованной озерной воды (pH 8; состав, *мг/л:* Ca^{++} 26, Mg^{++} 12, $Na^{+}+K^{+}$ 16, SO_4^{--} 8, Cl^{-} 5). Экстракты из листьев липы и осины имели pH 5, из хвои сосны — pH 4. В контрольном варианте десорбцию радиоизотопов проводили озерной водой с pH 5. Результаты химического анализа (табл. 1) показали, что наименьшее количество углерода и некоторых других макроэлементов содержит экстракт из хвои сосны, в то время как экстракт из листьев осины содержит эти элементы в наибольших количествах.

Радиоактивные изотопы вносили в виде простых солей ($Fe^{59}Cl_3$, $Co^{60}Cl_2$, $Sr^{90}Cl_2$) без добавления носителей. Почва — дерново-среднеподзолистая, гор. A_2 (Свердловская область): pH водной вытяжки 5,7; гумус 0,7%; обменный Ca^{++} 3,3 *мг·экв*/100 *г* почвы; обменный Mg^{++} 1,4 *мг·экв*/100 *г* почвы; P_2O_5 2,5 *мг*/100 *г* почвы; K_2O 21 *мг*/100 *г* почвы; степень насыщенности основаниями 66% (Фирсова, Ржанникова, 1966).

Все опыты проводились в двух повторностях. Полученные данные по содержанию радиоизотопов в фильтрате обработаны методом скользящей средней и представлены в виде соответствующих кривых.

Из рис. 1 видно, что в продолжение всего опыта содержание железа-59 в фильтрате контрольных колонок не превышает 1,5%. Экстракты из листьев осины, липы и сосны десорбируют, соответственно, 25, 15 и 3% Fe^{59} при пропускании через колонку первых трех объемов раствора. В дальнейшем десорбирующее действие экстрактов уменьшается, и к концу опыта оно приближается к действию воды.

Таблица 2

Содержание радиоизотопов в фильтрате колонок, % от найденного количества во всей колонке

Десорбент	Железо-59	Кобальт-60	Стронций-90
Озерная вода . . .	5,5	62,5	78,8
Экстракт из хвои сосны	24,0	94,2	87,8
Экстракт из листьев липы	36,0	91,8	88,8
Экстракт из листьев осины	62,0	92,5	88,6

Содержание радиокобальта в фильтрате в контрольном варианте постепенно падает к концу опыта от 12—14% до 3%. Десорбирующее действие экстрактов на первом этапе десорбции значительно превышает действие воды; для экстрактов из листьев липы и осины оно составляет 70—75%, из хвои сосны — 40%. Затем десорбция кобальта-60 экстрактами из листьев липы и осины резко снижается и уже при семи — восьми объемах раствора вырав-

нивается с контролем. Десорбция радиокобальта экстрактом из хвои сосны также уменьшается с увеличением числа объемов пропущенного раствора, но более постепенно, чем в случае предыдущих растительных десорбентов, и выравнивается с контролем при 20 объемах раствора.

Содержание радиостронция в фильтрате колонок в контроле незначительно уменьшается с увеличением числа объемов раствора (от 15 до 10% к концу опыта). Поступление стронция-90 из почвенной колонки в фильтрат под влиянием растительных экстрактов возрастает по сравнению с контролем в три — четыре раза при пропускании через нее первых двух — трех объемов раствора; затем десорбирующее действие экстрактов и воды выравнивается (при 7—11 объемах раствора), после чего содержание радиостронция в контроле становится даже несколько больше, чем в варианте с экстрактами. Различие в десорбирующем действии разных экстрактов проявляется слабо.

Содержание каждого из исследуемых радиоизотопов в фильтрате к концу опыта (при пропускании через колонку тридцати объемов раствора) при десорбции их из почвы экстрактами больше, чем при десорбции водой (табл. 2). Для железа различие между всеми десорбентами проявляется наиболее отчетливо, при этом исследованные природные десорбенты составляют ряд: озерная вода <экстракт из хвои сосны <экстракт из листьев липы <экстракт из листьев осины. Для кобальта-60 и стронция-90 можно лишь отметить сравнительно небольшое различие в десорбции озерной водой, с одной стороны, и растительными эстрактами, с другой. Различия же между экстрактами практически не наблюдается.

Распределение железа-59, кобальта-60 и стронция-90 по слоям почвенных колонок, независимо от варианта опыта, более или менее равномерное (рис. 2).

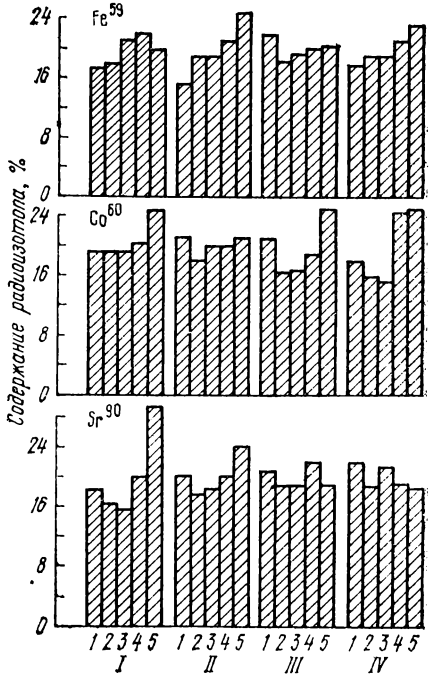


Рис. 2. Распределение радиоизотопов по слоям почвенной колонки.

I — вода; II — экстракт из хвои сосны; III — экстракт из листьев липы; IV — экстракт из листьев осины; *1—5* — слои почвенной колонки.

Сравнив результаты опытов, проведенных в динамических и статических (Чеботина, 1967) условиях, можно отметить, что в обоих типах опытов четко проявляется десорбирующее действие растительных экстрактов. При этом динамические опыты показали, что наибольшим десорбирующим действием растительные экстракты обладают на первых этапах их взаимодействия с почвой. По-видимому, это можно объяснить тем, что определенная часть радиоизотопов закрепляется в почве столь прочно, что специфическое действие растительных экстрактов на них не проявляется.

Выводы

1. В условиях динамических лабораторных опытов десорбция железа-59, кобальта-60 и стронция-90 из почвы растительными экстрактами превышает десорбцию этих элементов водой.

2. Содержание радиоизотопа в фильтрате почвенных колонок уменьшается с увеличением количества объемов пропущенного раствора, что свидетельствует о различной прочности закрепления исследуемых радиоизотопов в почве.

ЛИТЕРАТУРА

Чеботина М. Я. Влияние водных экстрактов из растительного материала на подвижность радиоизотопов в почве. Автореф. дисс. Свердловск, 1967.

Чеботина М. Я. Влияние растительных экстрактов на подвижность Fe^{59} и Co^{60} в почве в условиях динамических лабораторных опытов.— Радиохимия, 1971, т. 13, № 5.

Фирсова В. П., Ржанникова Г. К. Почвы Уралмашевского лесхоза Свердловской области.— Труды Института биологии УФАН СССР, 1966, вып. 55.

1975 | АКАДЕМИЯ НАУК СССР · УРАЛЬСКИЙ НАУЧНЫЙ ЦЕНТР
РАДИОЭКОЛОГИЧЕСКИЕ ИССЛЕДОВАНИЯ ПОЧВ И РАСТЕНИЙ

М. Я. ЧЕБОТИНА

ВЛИЯНИЕ ВОДОРАСТВОРИМОГО ВЕЩЕСТВА ЛЕСНОЙ ПОДСТИЛКИ НА ПОГЛОЩЕНИЕ РАДИОАКТИВНЫХ ИЗОТОПОВ В ПОЧВЕ

В серии работ, выполненных ранее в нашей лаборатории (Титлянова и др., 1959; Волкова и др., 1964; Чеботина, 1967, 1968а, б, 1971; Чеботина, Куликов, 1973), было показано, что экстракты (водные вытяжки) из листьев древесных и травянистых растений в значительной степени снижают сорбцию ряда радиоизотопов химических элементов почвой, увеличивая тем самым их миграционную способность. В этих опытах экстракты готовились путем 10-дневного настаивания воздушно-сухого растительного материала на маломинерализованной озерной или дистиллированной воде. Полученные таким способом экстракты по химическому составу и свойствам отличаются от соответствующих природных растворов, поступающих из подстилки в почву в естественных условиях.

В связи с этим представляет интерес оценка влияния выделенных из подстилок природных растворов (лизиметрических вод и центрифугатов) на коэффициенты распределения радиоизотопов ряда химических элементов в системе раствор — почва.

Природные растворы выделялись нами из подстилок, сформированных в различных типах лесных фитоценозов: сосняке мертвопокровном, березово-разнотравной и осиново-разнотравной группировках осиново-березового леса, а также липняке порослевом мертвопокровном. В названных фитоценозах были заложены экспериментальные площадки. С целью получения лизиметрических вод на площадках были установлены лизиметры под слоем подстилки на глубине 4 *см*. С опытных площадок сразу после дождя отбирали пробы подстилок; в процессе отбора подстилку разделяли на два слоя — верхний (цельные неразложившиеся и полуразложившиеся листья) и нижний (в значительной степени разложившиеся фракции растительных остатков). Выделение раствора производили центрифугированием подстилки на центрифуге типа ЦЛС-3 при 5000 *об/мин* в течение 15 *мин*.

Таблица 1

Химическая характеристика экспериментальных растворов

Раствор	Глубина, *см*	C, *мг/л*	pH	Ca^{++}, *мг/л*	Mg^{++}, *мг/л*
Лизиметрическая вода из подстилки					
сосняка	0—4	34	6,5	11	5
березняка	0—4	22	7	9	4
липняка	0—4	23	7	10	5
осинника	0—4	29	7	18	7
Центрифугат из подстилки					
сосняка	0—2	7380	5	92	72
	2—4	1782	5	42	92
березняка	0—2	1569	7	94	73
	2—4	732	7	111	56
липняка	0—2	735	6,5	95	41
	2—4	1008	6,5	91	71
осинника	0—2	1325	7	87	71
	2—4	792	7	39	96

Центрифугаты и лизиметрические воды фильтровались через бумажный фильтр, после чего в них вносили растворы хлористых соединений радиоизотопов железа-59, кобальта-60, стронция-90, иттрия-91, цезия-137 и церия-144. Радиоактивность исходных растворов по стронцию, иттрию, цезию и церию составляла 2—5 *мккюри/л*, а по железу и кобальту 10—30 *мккюри/л*. Концентрация кобальта в растворе была 10^{-3} *М*, железа 10^{-5} *М*; остальные элементы были взяты в невесомых количествах. Радиоактивные растворы (20 *мл*) и навески воздушно-сухой почвы (1 *г*) помещали в пробирки из оргстекла с навинчивающимися крышками и перемешивали до установления равновесного распределения радиоизотопов в системе почва — раствор. Раствор отделяли от почвы путем отстаивания в течение 24 *час*. Контролем служила отфильтрованная дождевая вода. Количество изотопа, поглощенного почвой, определялось по разности между радиоактивностью исходного раствора и радиоактивностью после взаимодействия его с почвой. О степени подвижности исследуемых радиоизотопов в системе почва — раствор судили по величине коэффициента распределения, который выражается отношением концентрации изотопа в почве к концентрации его в равновесном растворе.

Опыты проводились на дерново-луговой почве (pH водной вытяжки 6,7; гумус 12,2%; обменные Ca^{++} и Mg^{++} составляют 40,0 и 12,0 *мг·экв*/100 *г* почвы соответственно). Содержание радиоизотопов в растворе определяли на радиометре типа «Волна» со счетчиком БФЛ-Т-25 при статистической ошибке счета 5%.

Таблица 2

Коэффициенты распределения радиоизотопов в системе раствор — почва

Раствор	Глубина, см	Коэффициенты распределения					
		Железо-59	Кобальт-60	Стронций-90	Иттрий-91	Цезий-137	Церий-144
Лизиметрическая вода из подстилки							
сосняка	0—4	6,7±0,4	598±71	727±49	83±21	1194±66	231±29
березняка	0—4	5,5±0,7	710±60	719±75	80±6	725±166	367±19
липняка	0—4	9,1±0,9	663±152	563±111	175±16	920±161	251±28
осинника	0—4	6,9±0,4	395±66	459±42	214±35	1175±65	373±50
Центрифугат из подстилки							
сосняка	0—2	6,6±0,5	86±9	13±1	94±3	236±59	165±34
	2—4	14,7±1,7	188±41	61±1	170±3	713±170	153±23
березняка	0—2	6,4±0,1	65±1	96±2	51±6	777±104	79±7
	2—4	5,6±0,3	97±11	67±3	102±1	412±120	92±10
липняка	0—2	13,0±0,5	283±9	115±5	110±6	630±110	73±1
	2—4	4,4±0,3	83±2	—	—	521±68	70±5
осинника	0—2	12,9±1,3	66±2	100±10	34±2	1187±308	39±3
	2—4	—	91±8	68±13	44±2	—	65±1
Контроль (дождевая вода)	—	7,2±0,5	1165±370	1845±366	320±32	1223±278	838±52

Результаты химического анализа природных растворов (табл. 1) показывают, что лизиметрические воды по химическому составу заметно отличаются от центрифугатов. Последние содержат значительно больше органических веществ, а также кальция и магния; кроме того, центрифугаты из подстилки сосняка имеют более кислую реакцию, чем соответствующие лизиметрические воды.

Во всех вариантах опыта наиболее подвижным оказалось железо (табл. 2): оно в наименьшей степени, по сравнению с другими элементами, сорбируется почвой, и поэтому для него характерны наиболее низкие коэффициенты распределения. В присутствии лизиметрических вод наблюдается снижение коэффициентов распределения Co^{60}, Sr^{90}, Y^{91} и Ce^{144} в среднем в два — три раза по сравнению с контрольным вариантом. Сорбция почвой двух других изотопов — железа-59 и цезия-137 — в присутствии лизиметрических вод практически не отличается от контроля.

Центрифугаты в значительно большей степени, чем лизиметрические воды, снижают сорбцию кобальта-60, стронция-90, иттрия-91 и церия-144 почвой. Коэффициенты распределения указанных радиоизотопов под влиянием центрифугатов из подстилок в ряде случаев уменьшаются более чем на порядок величин по сравнению с контролем. Наблюдается также заметное снижение коэффициентов распределения цезия-137 в присутствии центрифугатов из подстилок сосняка, березняка и липняка. Что касается железа-59, то в целом сорбция его почвой под влиянием центрифугатов изменяется незначительно. Отмечена обратная зависимость между содержанием водорастворимых органических веществ в центрифугатах разных слоев подстилки каждого типа фитоценоза и коэффициентами распределения кобальта-60 и иттрия-91.

Выводы

1. Лизиметрические воды из различных типов подстилок естественных лесных биогеоценозов снижают сорбцию кобальта-60, стронция-90, иттрия-91, церия-144 почвой и не влияют на распределение железа-59 и цезия-137 в системе почва — раствор.

2. Центрифугаты из тех же типов подстилок снижают поглощение почвой кобальта-60, стронция-90, иттрия-91, цезия-137 и церия-144 и практически не изменяют величину сорбции железа-59.

3. Мобилизующее действие центрифугатов проявляется в более сильной степени, чем влияние лизиметрических вод, что, по-видимому, обусловлено более высоким содержанием в них растворенных органических и минеральных веществ по сравнению с лизиметрическими водами.

4. Отмечена обратная зависимость между содержанием водо-

растворимых органических веществ в центрифугатах разных слоев подстилки каждого типа биогеоценоза и коэффициентами распределения кобальта-60 и иттрия-91 в системе почва — раствор.

ЛИТЕРАТУРА

Волкова М. Я., Махонина Г. И., Титлянова А. А. Влияние природных экстрактов на сорбцию почвой некоторых радиоизотопов.— Почвоведение, 1964, № 3.

Титлянова А. А., Тюрюканов А. Н., Махонина Г. И. О десорбирующем действии природных экстрактов.— Докл. АН СССР, 1959, т. 126, № 6.

Чеботина М. Я. Влияние водных экстрактов из растительного материала на подвижность радиоизотопов в почве. Автореф. дисс. Свердловск, 1967.

Чеботина М. Я. Влияние водных экстрактов из листьев древесных растений на подвижность Mn^{54} в различных типах почв.— Труды Ин-та экологии растений и животных, УФАН СССР, 1968а, вып. 61.

Чеботина М. Я. К вопросу о природе десорбирующего действия экстрактов из растительного опада.— Труды Ин-та экологии растений и животных, УФАН СССР, 1968б, вып. 61.

Чеботина М. Я. Влияние растительных экстрактов на подвижность Fe^{59} и Co^{60} в почве в условиях динамических лабораторных опытов.— Радиохимия, 1971, № 5.

Чеботина М. Я., Куликов Н. В. Влияние водорастворимых продуктов разложения травянистых растений на поглощение радиоактивных изотопов в почве.— Экология, 1973, № 1.

1975 | АКАДЕМИЯ НАУК СССР · УРАЛЬСКИЙ НАУЧНЫЙ ЦЕНТР
РАДИОЭКОЛОГИЧЕСКИЕ ИССЛЕДОВАНИЯ ПОЧВ И РАСТЕНИЙ

Н. В. КУЛИКОВ, И. В. МОЛЧАНОВА, Л. И. ПИСКУНОВ

МИГРАЦИЯ СТРОНЦИЯ-90 И ЦЕЗИЯ-137 В ЛЕСНЫХ ПОЧВАХ

Изучение закономерностей миграции и распределения радиоактивных изотопов в лесных почвах — одна из актуальных задач лесной радиоэкологии. Интерес к этой проблеме понятен: радиоактивные вещества, попадающие в лесные насаждения, со временем накапливаются в почве, откуда затем вновь вовлекаются по корневому пути в надземные части растений (Абатуров и др., 1968; Alexakhin et al., 1969; Алексахин и др., 1970; Молчанова, Куликов, 1972; Молчанова и др., 1973).

В настоящей работе рассматриваются результаты опытов по изучению миграции стронция-90 и цезия-137 в лесных почвах на сопряженных участках горного ландшафта при искусственном внесении радионуклидов в подстилку.

Опытные площадки были заложены в 1965 г. на вершине, в средней части и у подножия восточного склона Ильменского хребта на Южном Урале в спелых сосновых древостоях, произрастающих соответственно на примитивно-аккумулятивной, буроземовидной и дерново-подзолистой почвах. Тип леса на вершине хребта — сосняк брусничный, в средней части склона — сосняк ягодниковый и у подножия — сосняк разнотравно-папоротниковый. Высота хребта над уровнем моря порядка 450—500 *м*, крутизна склона в пределах 5—10°.

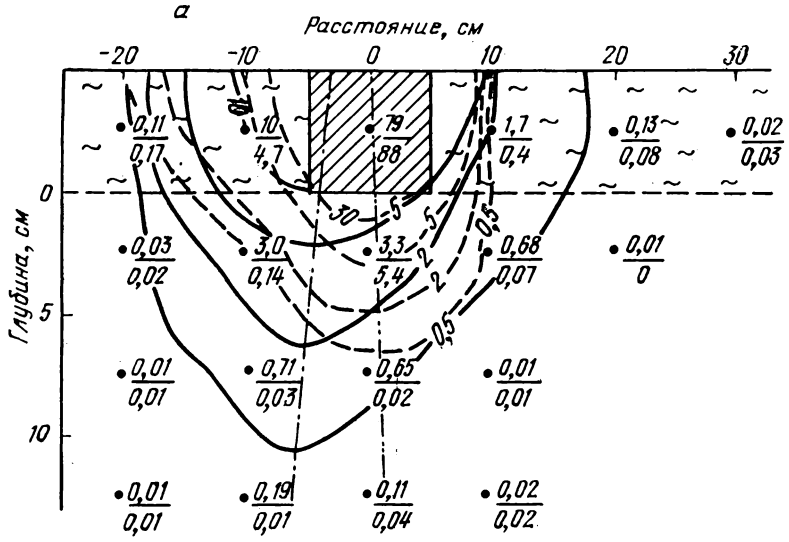
Примитивно-аккумулятивная почва по механическому составу относится к супеси, буроземовидная и дерново-подзолистая — к суглинкам (табл. 1). Водный режим в сосняке брусничном — промывного типа, отличается почти ежегодным сильным летним дефицитом почвенной влаги. В сосняках ягодниковом и разнотравно-папоротниковом водный режим периодически промывного типа. Здесь дефицит почвенной влаги менее выражен (Миронов, 1961).

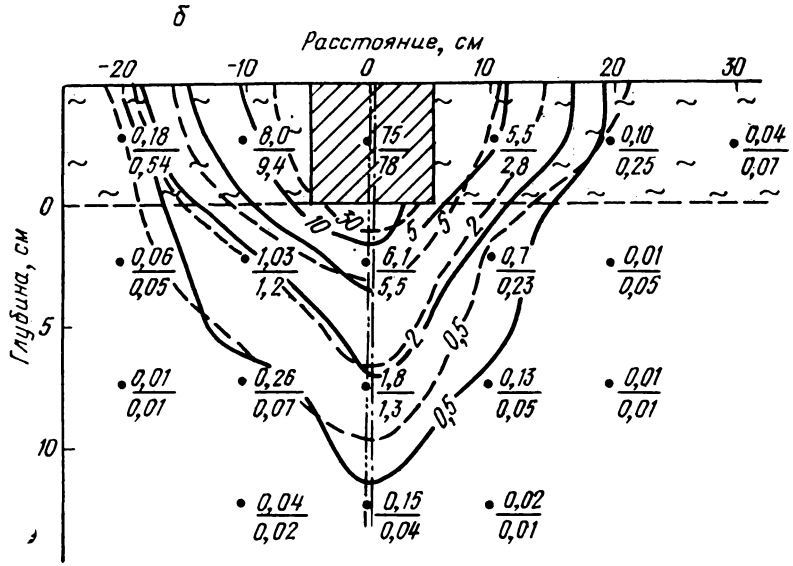
На выбранных участках освобождали от подстилки площадки размером 10×10 см, которые располагались рядами через 100 *см* с расстоянием между площадками в ряду 150 *см*. В одном опыте подстилки замачивали в водном растворе $Sr^{90}Cl_2$, в

Таблица 1

Краткая физико-химическая характеристика почв опытных площадок

Элемент рельефа	Тип биогеоценоза	Почва	Горизонт	Глубина, *см*	pH водной суспензии	Гумус, %	Содержание обменных оснований, *мг-экв*/100 *г*			Механический состав почв, %, по фракциям, *мм*		
							Ca	Mg	Ca+Mg	1,0—0,01	0,01—0,001	<0,001
Вершина хребта	Сосняк-брусничник	Примитивно-аккумулятивная	A_0	0—6	4,7	—	—	—	—	—	—	—
			A_1	6—15	5,3	14,7	27,5	4,6	32,1	81,6	9,2	9,2
			AC	15—25	5,4	1,4	3,2	0,3	3,5	85,4	8,1	6,5
Средняя часть склона	Сосняк ягодниковый	Буроземовидная	A_0	0—4	5,2	—	—	—	—	—	—	—
			A_1	4—9	5,7	10,8	16,5	4,7	21,2	62,3	22,8	14,9
			A_1A_2	9—20	5,5	1,1	3,4	1,6	5,0	65,4	19,7	14,9
			BC	20—55	5,6	0,5	1,3	1,1	2,4	61,3	22,0	16,7
Подножие склона	Сосняк разнотравно-папоротниковый	Дерново-подзолистая	A_0	0—4	5,1	—	—	—	—	—	—	—
			A_1	4—12	5,2	2,4	8,8	2,4	11,2	58,6	24,5	16,9
			AC	12—35	5,3	0,5	8,0	1,9	9,9	68,8	21,1	10,1


а
Расстояние, см
-20
-10
0
10
20
30
Глубина, см
0
5
10
0,11
0,17
10
4,7
79
88
1,7
0,4
0,13
0,08
0,02
0,03
0,03
0,02
3,0
0,14
3,3
5,4
0,68
0,07
0,01
0
0,01
0,01
0,71
0,03
0,65
0,02
0,01
0,01
0,01
0,01
0,19
0,01
0,11
0,04
0,02
0,02
30
5
2
0,5


б
Расстояние, см
-20
-10
0
10
20
30
Глубина, см
0
5
10
0,18
0,54
8,0
9,4
75
78
5,5
2,8
0,10
0,25
0,04
0,07
0,06
0,05
1,03
1,2
6,1
5,5
0,7
0,23
0,01
0,05
0,01
0,01
0,26
0,07
1,8
1,3
0,13
0,05
0,01
0,01
0,04
0,02
0,15
0,04
0,02
0,01
30
10
5
2
0,5

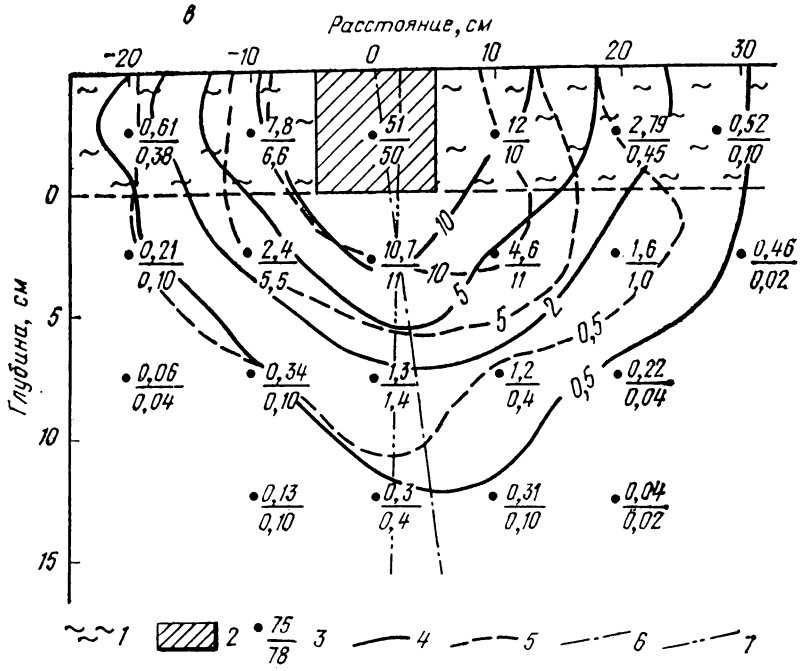


Рис. 1. Распределение Sr^{90} и Cs^{137} в почвенном профиле на вершине (*а*), в средней части (*б*) и у подножия склона (*в*) через четыре года после внесения радионуклидов в лесную подстилку.

1 — подстилка, *2* — место внесения Sr^{90} и Cs^{137}, *3* — геометрические центры послойного опробования и относительные концентрации Sr^{90} (числитель) и Cs^{137} (знаменатель), *4* и *5* — изолинии концентраций Sr^{90} и Cs^{137} соответственно, *6* и *7* — оси максимальной миграции Sr^{90} и Cs^{137} соответственно.

другом — в растворе $Cs^{137}Cl_2$, после чего их в равных весовых количествах укладывали на ранее освобожденные места. В каждую экспериментальную площадку вносили по 20 *мккюри* соответственно стронция-90 или цезия-137.

Через четыре года после внесения радиоизотопов произвели разборку площадок элементарными объемами подстилки и почвы (размером 10×10×5 *см* вверх и вниз от места внесения по склону). Из каждого тщательно перемешанного образца (подстилки или почвы) составляли среднюю пробу, которую высушивали до воздушно-сухого состояния и растирали в ступке. Содержание радиоизотопов в представительных навесках определяли в пяти повторностях на радиометре типа Б-2 со счетчиком БФЛ-Т-25. Время счета подбиралось такое, чтобы статистическая ошибка не превышала 5%. В среднем при двукратной повторности опыта на каждый образец почвы или подстилки приходилось по 10 радиометрических измерений. Воспроизводи-

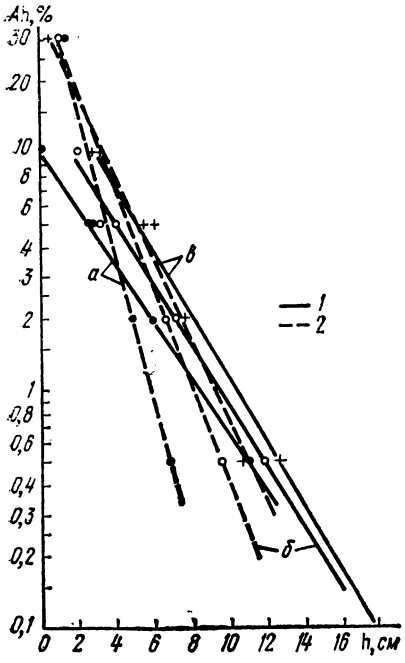


Рис. 2. Вертикальное распределение Sr^{90} (*1*) и Cs^{137} (*2*) в почве по осям максимальной миграции на вершине (*а*), в средней части (*б*) и у подножия склона (*в*).

мость измерений оценивалась в виде среднего квадратичного отклонения S_A из n парных измерений

$$S_A = \sqrt{\frac{\Sigma (A_1 - A_2)^2}{2n}},$$

где A_1 и A_2 — среднее содержание радионуклидов в параллельных образцах почвы и подстилки по повторностям опыта. В опытах со стронцием величина S_A составила от 1,9 до 3,3%, а в опытах с цезием — от 1,4 до 2,1%, что свидетельствует о надежной воспроизводимости результатов.

На рис. 1 приведены изолинии концентраций (изоконцентраты) радионуклидов в почвенном профиле экспериментальных площадок к моменту завершения опыта, т. е. через четыре года после внесения их в лесную подстилку. Концентрации стронция и цезия выражены в процентах от суммы их концентраций во всех исследованных элементарных объемах, центры которых на рисунке обозначены соответствующими точками. Это позволяет сравнить ореолы рассеяния обоих радионуклидов на разных участках. Изоконцентраты в данном случае строились методом линейной интерполяции. Видно, что оба радионуклида мигрируют по подстилке преимущественно в горизонтальном направлении от места внесения. Однако почти во всех экспериментальных точках, расположенных за пределами места внесения, относительное содержание стронция-90 заметно выше содержания цезия-137. Следовательно, в целом в почвенном профиле обследованных участков стронций оказался более подвижным, чем цезий. Об этом же свидетельствуют графики вертикального распределения радионуклидов в почвах, зафиксированные по осям максимальной миграции (рис. 2). Можно заметить, что на всех экспериментальных участках распределение радионуклидов по глубине почвы достаточно хорошо аппроксимируется экспоненциальной зависимостью

$$A_h = A_0 \exp\left(-0{,}693 \frac{h}{h_0}\right),$$

Таблица 2

Параметры уравнений регрессии A_h по h

Местоположение опытных площадок	Индекс линий	Для стронция-90		Для цезия-137		$\frac{h'_0}{h''_0}$
		A_0, %	h_0^1, *см*	A_0, %	h_0'', *см*	
Вершина склона	*а*	10	2,5	61	1,0	2,5
Средняя часть	*б*	16	2,3	52	1,4	1,5
Подножие склона . . .	*в*	26	2,2	42	1,7	1,3

где A_0 и A_h — соответственно содержание радионуклидов на поверхности почвы и на глубине h, h_0 — глубина полумиграции, численно равная расстоянию от поверхности, на котором содержание радионуклида в почве снижается наполовину (Куликов, Пискунов, 1970, 1971; Молчанова и др., 1973). Из параметров уравнения регрессии A_h по h, представленных в табл. 2, видно, что глубина полумиграции стронция-90 в 1,3—2,5 раза выше таковой цезия-137. При этом различия величин h_0 как для стронция, так и для цезия на участках, расположенных на вершине, средней части и у подножия склона, оказались недостоверными. Следовательно, скорость вертикальной миграции каждого радионуклида в отдельности в почвах различных типов лесных биогеоценозов в данном случае была практически одинакова, хотя стронций на всех участках перемещался в глубь почвы быстрее, чем цезий.

Экспоненциальный характер зависимости распределения стронция-90 и цезия-137 от глубины почвы показывает, что в условиях проведенного эксперимента миграция обоих радионуклидов в почве в основном определяется процессами диффузии (Куликов, Пискунов, 1969; Белова и др., 1971; Прохоров, Фрид, 1971). Учитывая это, можно рассчитать эффективные скорости диффузии $\tilde{v}_D$ и коэффициенты диффузии $\tilde{D}$. Для этого воспользуемся предельной формулой диффузии (Махонько, 1969)

$$C_h = \frac{C_0}{\tilde{v}_D t} \exp\left(-\frac{h}{\tilde{v}_D t}\right),$$

где C_h — концентрация радионуклида на глубине h; C_0 — плотность радиоактивного загрязнения поверхности почвы; t — время. Полагая, что $C_h/C_0/\tilde{v}_D t = 0{,}5$, получим $\exp\left(-h_0/\tilde{v}_D t\right) = 0{,}5$, откуда $\tilde{v}_D = 1{,}44\ h_0/t$ и $\tilde{D} = \tilde{v}_D h_1$ при фиксированном приращении глубины $h_1 = 1$ *см*.

Расчетные величины $\tilde{v}_D$ и $\tilde{D}$ за время $t = 4$ года приведены в табл. 3. Данные показывают, что эффективные параметры диф-

Таблица 3

Эффективные параметры диффузии радионуклидов в почве (значения *а*, *б*, *в* те же, что и в табл. 2)

Радионуклиды	Скорость диффузии $\tilde{v}_D$, *см/год*			Коэффициент диффузии $\tilde{D}$, 10^{-8} *см²/сек*		
	а	*б*	*в*	*а*	*б*	*в*
Стронций-90	0,9	0,8	0,8	2,8	2,6	2,5
Цезий-137	0,4	0,5	0,6	1,1	1,5	1,9

фузии стронция-90 также заметно выше, чем у цезия-137. Это можно объяснить более прочной фиксацией микроколичеств цезия-137 в почве по сравнению со стронцием-90 (Тимофеев-Ресовский и др., 1966).

Полученные данные позволяют сделать прогноз миграции радионуклидов в глубь почвы на будущие годы. Для этого воспользуемся понятием центра запаса радионуклида в почве (Брендаков, 1971).

Если обозначить глубину до центра запаса через h_c, то

$$h_c = \frac{\Sigma C_i h_i}{\Sigma C_i},$$

где C_i — концентрация радионуклида в i-м слое почвы, h_i — глубина от поверхности до средины этого слоя.

Результаты расчетов приведены в табл. 4, в которой глубины центров запаса радионуклидов на 1966 и 1969 гг. рассчитаны по экспериментальным данным, а на 1972 и 1975 гг. получены путем графической экстраполяции. Как видим из таблицы, центры запаса смещаются очень слабо, имея тенденцию к затуханию во времени. Такой вывод косвенно подтверждается многочисленными данными, свидетельствующими о том, что за многие годы глобальных радиоактивных выпадений основное количество осколочных радионуклидов все еще остается в пре-

Таблица 4

Глубина центров запаса радионуклидов в разные годы, *см*

Местоположение опытных площадок	Стронций-90				Цезий-137			
	1966	1969	1972	1975	1966	1969	1972	1975
Вершина склона	2,6	3,1	3,4	3,5	2,7	2,8	2,9	2,9
Средняя часть	2,6	3,2	3,5	3,6	2,9	3,0	3,1	3,1
Подножие склона . . .	2,7	4,0	4,5	4,7	2,8	4,2	4,5	4,6

делах верхнего (0—5 *см*) слоя почвы (Павлоцкая и др., 1970). За помощь в работе авторы выражают глубокую благодарность Б. А. Миронову, М. Я. Чеботиной и Р. Н. Перепеловской.

Выводы

1. Через четыре года после внесения стронция-90 и цезия-137 в лесную подстилку оба радионуклида преимущественно мигрировали в горизонтальном направлении от места внесения по лесной подстилке, в меньшей степени проникая в глубь почвы. При этом основная доля радионуклидов оставалась в зоне первоначального внесения (см. рис. 1).

2. На всех экспериментальных участках, независимо от типа лесного биогеоценоза, стронций-90 оказался более миграционно способным, чем цезий-137.

3. Вертикальное распределение стронция-90 и цезия-137 по глубине почвы во всех случаях удовлетворительно аппроксимируется экспоненциальной зависимостью, что указывает на преобладание процессов диффузии радионуклидов в почве над другими механизмами миграции. В условиях проведенного эксперимента эффективные коэффициенты диффузии для стронция-90 составили в среднем $2{,}5 \cdot 10^{-8}$ *см*^{2}/*сек*, а для цезия-137 — $1{,}5 \cdot 10^{-8}$ *см*^{2}/*сек*. Скорость диффузии 0,8 и 0,5 *см/год* соответственно.

4. Полученные результаты опытов позволили дать прогноз миграции радионуклидов в глубь почвы на ближайшие годы.

ЛИТЕРАТУРА

Абатуров Ю. Д., Махонина Г. И., Молчанова И. В., Тимофеев-Ресовский Н. В., Титлянова А. А., Чеботина М. Я. Миграция и распределение некоторых радиоизотопов в наземных биогеоценозах.— Проблемы ботаники, 1968, № 10.

Алексахин Р. М., Тихомиров В. А., Куликов Н. В. Состояние и задачи лесной радиоэкологии.— Экология, 1970, № 1.

Белова Е. И., Погодин Р. И., Коготков А. Я. Роль диффузии в перемещении стронция-90 по профилю почв.— Информ. бюлл. «Радиобиология», 1971, вып. 13.

Брендаков В. Ф., Дибцева А. В., Свищева В. И., Чуркин В. Н. Вертикальное распределение и оценка подвижности продуктов ядерных взрывов в некоторых типах почв Советского Союза.— Труды Института экспериментальной метеорологии, 1970, вып. 5.

Куликов Н. В., Пискунов Л. И. Изучение влияния люцерны на вертикальную миграцию кобальта и церия в почве.— Агрохимия, 1969, № 2.

Куликов Н. В., Пискунов Л. И. О роли растений в вертикальной миграции стронция-90 и цезия-137 в почве.— Агрохимия, 1970, № 7.

Куликов Н. В., Пискунов Л. И. Количественная оценка влияния растительности на вертикальную миграцию радиоактивных изотопов в почве.— Методы радиоэкологических исследований. М., Атомиздат, 1971.

Махонько К. П. Вид профилей концентраций продуктов деления в почве при глобальных и локальных выпадениях.— Сборник трудов АФНИИ, 1969, вып. 18.

Миронов Б. А. Гидрологические особенности лесов Ильменского заповедника.— Труды Ин-та биологии УФАН СССР, 1961, вып. 25.

Молчанова И. В., Куликов Н. В. Радиоактивные изотопы в системе почва — растение. М., Атомиздат, 1972.

Молчанова И. В., Куликов Н. В., Пискунов Л. И. Экспериментальное изучение миграции стронция-90 в почвах лесных биогеоценозов.— Экология, 1973, № 5.

Павлоцкая Ф. И., Тюрюканова Э. Б., Баранов В. И. Глобальное распределение стронция-90 по земной поверхности. М., «Наука», 1970.

Прохоров В. М., Фрид А. С. Расчет вертикального перемещения стронция-90 в однородных почвах.— Информ. бюлл. «Радиобиология», 1971, вып. 13.

Тимофеев-Ресовский Н. В., Титлянова А. А., Тимофеева Н. А., Махонина Г. И., Молчанова И. В., Чеботина М. Я. Поведение радиоизотопов в системе почва — раствор.— Радиоактивность почв и методы ее определения. М., «Наука», 1966.

Alexakhin R. M., Karaban R. T., Kulikov N. V., Molchanov A. A., Naryschkin M. A., Tarchevskaya S. V., Tikhomirov F. A., Tyuryukanova E. B., Yushkov P. J. Some aspects of radioactive fission products migration in the forest biogeocenoses and the effects of ionizing radiations on the woody plants.— CEA DPSR DPS, Cadarache, 1969, vol. 2.

1975 АКАДЕМИЯ НАУК СССР · УРАЛЬСКИЙ НАУЧНЫЙ ЦЕНТР
РАДИОЭКОЛОГИЧЕСКИЕ ИССЛЕДОВАНИЯ ПОЧВ И РАСТЕНИЙ

Е. Н. КАРАВАЕВА

ВЛИЯНИЕ ВЛАЖНОСТИ ПОЧВЫ НА ПОВЕДЕНИЕ СТРОНЦИЯ-90, ЦЕЗИЯ-137 И ЦЕРИЯ-144 В СИСТЕМЕ ПОЧВА — РАСТЕНИЕ

Поведение радиоизотопов в системе почва — растение определяется рядом факторов, к числу которых следует отнести и водный режим почв, поскольку от него в значительной мере зависят процессы жизнедеятельности растений и темпы вовлечения химических элементов в биологический круговорот. К настоящему времени роль почвенной влаги в процессах миграции и накоплении радиоизотопов в почвенно-растительном покрове исследована недостаточно. Имеющиеся по этому вопросу немногочисленные данные довольно противоречивы. По результатам опытов ряда исследователей увеличение влажности почвы приводит к усилению поступления стронция-90 в растения (Миронов, 1971; Emmert, 1963). Получены и противоположные результаты (Schulz и др., 1959). Некоторые авторы считают, что накопление стронция-90 растениями практически не зависит от уровня увлажнения почвы (Харчук, Абатуров, 1970; Stewart, Hungate, 1967).

Невыясненным остается также вопрос о характере накопления цезия-137 растениями из почв с разной степенью увлажнения. Единой точки зрения среди исследователей по этому вопросу нет (Харчук, Абатуров, 1970; Pendleton, Uhler, 1960; Tensho Kiyoshi et. al., 1961; Stewart, Hungate, 1967). Результаты опытов часто несравнимы, так как эксперименты проводились по разным методикам и с различными объектами.

Цель настоящей работы — последовательное, с применением единой методики, изучение влияния влажности почвы на поведение стронция-90, цезия-137 и церия-144 в модельной системе почва-растение.

МЕТОДИКА ПРОВЕДЕНИЯ ОПЫТОВ

Влияние влажности почвы на поведение радиоизотопов мы исследовали в условиях вегетационных опытов, которые проводились в вегетационном домике. В опытах использовали три

различные по физико-химическим свойствам почвы: дерново-луговую, горизонт А (Южный Урал, Ильменский заповедник), дерново-подзолистую, горизонт A_2 (Средний Урал, Свердловская область) и торфянисто-глеевую, горизонт B_g (лесотундра Зауралья, стационар «Харп»). Физико-химическая характеристика этих почв приведена в табл. I статьи Е. Н. Караваевой, И. В. Молчановой и Н. В. Куликова «Влияние влажности почвы на поведение стронция-90, цезия-137 и церия-144 в системе почва — раствор» в настоящем сборнике.

Дерново-луговую и торфянисто-глеевую почвы смешивали с песком в соотношении 1 : 1, а дерново-подзолистую почву — в соотношении 2 : 1 по объему. Растворы радиоизотопов без добавления носителей вносили в почвенную смесь путем полива и последующего перемешивания в следующих концентрациях, *мккюри/кг:*

	Стронций-90	Цезий-137	Церий-144
Дерново-луговая	110	254	360
Дерново-подзолистая . .	140	196	190
Торфянисто-глеевая . . .	90	183	200

После внесения радиоизотопов почвенную смесь помещали в вегетационные сосуды (по 2 *кг* на один сосуд в двух повторностях) и засевали семенами девяти видов растений, которые по требованию к почвенному увлажнению в естественных условиях произрастания можно распределить на три экологические группы: 1) гигромезофиты: лисохвост луговой (*Alopecurus pratensis* L.), бескильница Гаупта (*Puccinella Hauptiana* (Trin.) V. Krez.); 2) мезофиты: овсяница луговая (*Festuca pratensis* Huds.), овсяница красная (*F. rubra* L.), овсяница тростниковая (*F. arundinacea* Schreb.), костер безостый (*Bromus inermis* Leyss), клевер луговой (*Trifolium pratense* L.); 3) ксеромезофиты: житняк ширококолосый (*Agropuron pectiniforme* Roem. et Schult.), овсяница овечья (*Festuca ovina* L.).

Таким подбором растений предполагалось приблизить каждый вариант опыта по влажности почвы к оптимальным условиям произрастания одной из трех групп, оставляя другие группы в менее благоприятных условиях. В соответствии с этим влажность почвенной смеси в зависимости от варианта опыта поддерживали в следующих пределах: 1) от полной влагоемкости до наименьшей; 2) от наименьшей влагоемкости до влажности разрыва капилляров и 3) от влажности разрыва капилляров до влажности завядания. Выбор этих интервалов обусловлен еще и тем, что при переходе от одного из них к другому резко меняется подвижность влаги в почве и доступность ее растениям (Роде, 1965).

Во время опыта влажность почвы в сосудах поддерживали примерно в середине каждого из вышеуказанных интервалов,

что составляло 80, 50 и 25% от полной влагоемкости почвы. Заданный уровень влажности контролировали весовым способом.

Растения выращивались в монокультуре. За время опыта (30 дней) они успевали развиться до фазы второго — третьего настоящего листа, а корни — проникнуть до дна сосуда. По окончании опыта растения разделяли на надземную массу и корни, из которых готовили зольные препараты в четырех-шести повторностях для измерения радиоактивности. Почву высушивали до воздушно-сухого состояния, отбирали среднюю пробу, а затем готовили по четыре-шесть параллельных проб, помещая на алюминиевую тарелочку по 1 *г* почвы.

Таблица 1

Влияние влажности дерново-луговой почвы на биомассу растений

Экологическая группа	Название растения	Влажность почвы, % от полной влагоемкости	Абсолютно сухой вес надземной массы 100 растений, *г*
Гигромезофиты	Лисохвост луговой	25	0,24±0,010
		50	0,59±0,020
		80	0,82±0,020
	Бескильница Гаупта	25	0,03±0,003
		50	0,09±0,006
		80	0,08±0,002
Мезофиты	Овсяница красная	25	0,24±0,020
		50	0,66±0,070
		80	0,88±0,030
	Овсяница луговая	25	0,35±0,001
		50	1,35∓0,020
		80	1,83±0,040
	Овсяница тростниковая	25	0,42±0,020
		50	1,18±0,030
		80	1,74±0,060
	Костер безостый	25	0,37±0,010
		50	0,94±0,030
		80	1,54±0,060
	Клевер луговой	25	0,39±0,004
		50	0,63±0,020
		80	0,77±0,020
Ксеромезофиты	Житняк ширококолосый	25	0,34±0,010
		50	0,65±0,020
		80	0,85±0,040
	Овсяница овечья	25	0,18±0,006
		50	0,49±0,010
		80	0,55±0,020

Содержание радионуклидов в приготовленных образцах почв и растений определяли с помощью радиометра ПП-8 с торцовым счетчиком Т-25-БФЛ при статистической ошибке счета 3—5%. При расчетах везде, где было необходимо, вводили поправки на самопоглощение и радиоактивный распад.

Использованная в опытах концентрация радиоактивных изотопов в целом не оказала влияния на рост и развитие растений, поскольку между опытными и контрольными растениями не было обнаружено существенных различий в весе и стадиях развития.

РЕЗУЛЬТАТЫ ОПЫТОВ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Влияние влажности почвы на биомассу растений

Из табл. 1 следует, что при снижении влажности дерново-луговой почвы от 80 до 25% от полной влагоемкости абсолютно сухой вес надземной массы растений уменьшается в 3—5 раз в зависимости от вида подопытных растений. Прямая зависи-

Таблица 2

Влияние влажности дерново-подзолистой и торфянисто-глеевой почв на биомассу растений

Название растения	Влажность почвы, % от полной влагоемкости	Абсолютно сухой вес надземной массы 100 растений, *г*	
		Дерново-подзолистая	Торфянисто-глеевая
Овсяница красная	25	0,14±0,01	0,14±0,02
	50	0,22±0,02	0,17±0,01
	80	0,28±0,02	0,17±0,01
Овсяница луговая	25	0,27±0,02	0,22±0,01
	50	0,34±0,03	0,32±0,03
	80	0,36±0,02	0,27±0,02
Овсяница тростниковая	25	0,38±0,01	0,26±0,02
	50	0,39±0,02	0,32±0,02
	80	0,49±0,01	0,36±0,02
Костер безостый	25	0,32±0,01	0,33±0,01
	50	0,48±0,02	0,46±0,01
	80	0,68±0,01	0,53±0,03
Клевер луговой	25	0,35±0,01	0,38±0,02
	50	0,52±0,01	0,67±0,05
	80	0,67±0,01	0,82±0,06

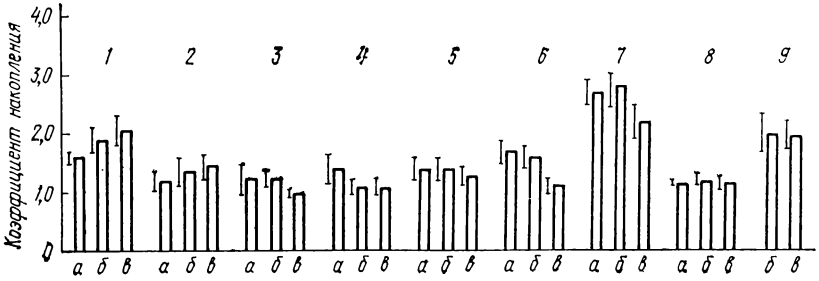


Рис. 1. Коэффициенты накопления стронция-90 для надземной массы растений в зависимости от влажности дерново-луговой почвы. Черточками обозначены среднеквадратические ошибки.

1 — лисохвост луговой, *2* — бескильница Гаупта, *3* — овсяница луговая, *4* — овсяница тростниковая, *5* — овсяница красная, *6* — костер безостый, *7* — клевер луговой, *8* — житняк ширококолосый, *9* — овсяница овечья.

а, б, в — влажность почвы соответственно 25, 50, 80% от полной влагоемкости.

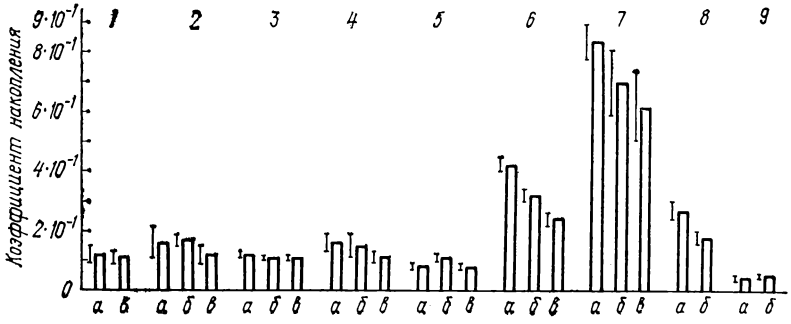


Рис. 2. Коэффициенты накопления цезия-137 для надземной массы растений в зависимости от влажности дерново-луговой почвы. Обозначения те же, что и на рис. 1.

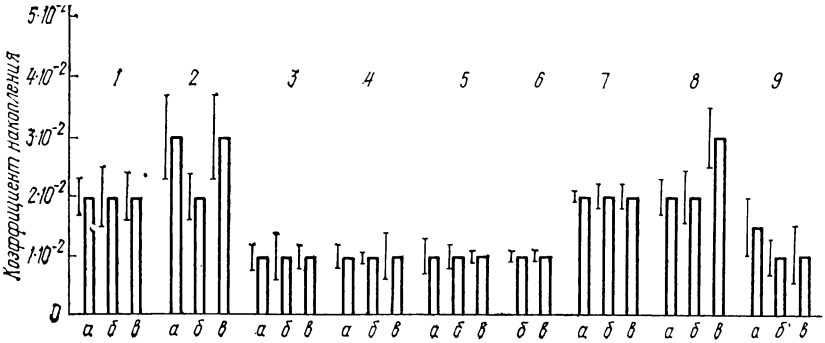


Рис. 3. Коэффициенты накопления церия-144 для надземной массы растений в зависимости от влажности дерново-луговой почвы. Обозначения те же, что и на рис. 1.

симость между степенью почвенного увлажнения и нарастанием биомассы отмечена у растений всех трех экологических групп (см. табл. 1), что связано с определенной условностью распределения подопытных растений по признаку их отношения к почвенной влаге. Подобные результаты были получены раньше Максимовым и Александровым для ряда видов, принадлежащих по этому признаку к разным экологическим группам (Максимов, Александров, 1917).

Влажность дерново-подзолистой и торфянисто-глеевой почв повлияла на нарастание биомассы растений в меньшей степени (табл. 2). Возможно, накоплению сухого вещества растениями препятствует недостаточное содержание в этих почвах не только влаги, но и минеральных питальных веществ.

Накопление стронция-90, цезия-137 и церия-144 в зависимости от влажности почвы

Дерново-луговая почва. Способность растений концентрировать радиоизотопы из внешней среды характеризуется коэффициентом накопления, который определяется отношением концентраций изотопа в растении и в окружающей среде.

Коэффициенты накопления стронция-90 варьируют незначительно с изменением влажности почвы (рис. 1). Для всех изученных видов растений не обнаружено достоверных различий между величинами коэффициентов накопления разных по степени увлажнения вариантов опыта ($P=0{,}05$). Наиболее высокие зна-

Таблица 3

Коэффициенты накопления для надземной массы растений в зависимости от влажности дерново-луговой почвы (усредненные данные по экологическим группам растений)

Экологическая группа	Влажность почвы, % от полной влагоемкости	Стронций-90	Цезий-137	Церий-144
Гигромезофиты	25	1,38±0,09	0,14±0,03	0,025±0,006
	50	1,62±0,15	—	0,020±0,003
	80	1,77±0,16	0,12±0,02	0,025±0,004
Мезофиты	25	1,69±0,11	0,32±0,07	0,012±0,001
	50	1,66±0,12	0,28±0,05	0,012±0,001
	80	1,33±0,09	0,23±0,05	0,015±0,001
Ксеромезофиты	25	1,33±0,16	0,16±0,04	0,018±0,004
	50	1,60±0,16	0,12±0,02	0,015±0,002
	80	1,55±0,16	—	0,020±0,006

чения коэффициентов накопления стронция-90 отмечены для надземной массы клевера лугового.

Величины коэффициентов накопления цезия-137, как и у стронция-90, практически не зависят от влажности почвы (рис. 2). Клевер луговой и костер безостый концентрируют в надземной массе цезия больше, чем остальные подопытные растения.

Влажность почвы не повлияла и на величину коэффициентов накопления церия-144 (рис. 3). Из рисунка следует, что поступление церия в надземную массу четырех видов овсяницы происходит менее интенсивно по сравнению с другими видами растений.

Значения коэффициентов накопления радиоизотопов у разных экологических групп растений определяются в основном химическими свойствами элементов и очень незначительно варьируют по каждому радиоизотопу в зависимости от влажности почвы (табл. 3).

Накопление радиоактивных изотопов количественно можно оценивать не только величиной коэффициентов накопления, но и общим выносом надземной массой из почвы на дневную поверхность. Как следует из табл. 4, вынос стронция-90, цезия-137 и церия-144 растениями находится в прямой зависимости от влажности почвы и определяется в основном количеством биомассы, поскольку концентрация радиоизотопов в растениях практически не изменяется. Наиболее высокий ($70 \cdot 10^{-3}$) про-

Таблица 4

Вынос * радиоизотопов надземной массой растений в зависимости от влажности дерново-луговой почвы (% от внесенного в почву количества на 100 растений и *нкюри* на 1 *г* сухого вещества)

Экологическая группа	Влажность почвы, % от полной влагоемкости	Стронций-90		Цезий-137		Церий-144	
		10^{-3} %	*нкюри*	10^{-3} %	*нкюри*	10^{-3} %	*нкюри*
Гигромезофиты	25	9,0	152	1,0	36	0,2	9,0
	50	18,0	178	—	—	0,5	7,0
	80	36,0	194	3,0	30	0,5	9,0
Мезофиты	25	26,0	186	6,0	81	0,3	5,0
	50	56,0	183	12,0	71	0,7	5,0
	80	70,0	146	11,0	58	0,8	4,0
Ксеромезофиты	25	10,0	146	3,0	48	0,4	6,0
	50	30,0	176	4,0	30	0,5	5,0
	80	36,0	170	—	—	1,0	7,0

* Усредненные данные по экологическим группам растений.

Таблица

Коэффициенты накопления радиоизотопов для надземной массы растений в зависимости от влажности дерново-подзолистой почвы

Название растения	Влажность почвы, % от полной влагоемкости	Стронций-90	Цезий-137	Церий-144
Овсяница красная	25	10,78±0,88	—	0,13±0,02
	50	11,10±1,32	0,81±0,16	0,12±0,01
	80	10,20±0,45	1,05±0,06	0,09±0,01
Овсяница луговая	25	7,44±1,00	1,20±0,09	0,12±0,02
	50	7,01±0,27	0,83±0,08	0,15±0,01
	80	7,22±0,20	1,05±0,12	0,19±0,02
Овсяница тростниковая	25	7,76±0,47	1,50±0,14	0,12±0,01
	50	6,02±0,08	1,43±0,14	0,12±0,01
	80	5,21±0,28	1,40±0,05	0,09±0,01
Костер безостый	25	6,16±0,55	1,76±0,26	0,16±0,01
	50	6,58±0,24	2,01±0,37	0,13±0,01
	80	6,90±0,23	1,48±0,18	0,10±0,01
Клевер луговой	25	21,52±2,02	1,60±0,20	0,29±0,03
	50	17,68±1,17	2,14±0,24	0,34±0,01
	80	19,01±2,00	1,55±0,18	0,31±0,01
Среднее	25	10,73±0,99	1,52±0,12	0,16±0,02
	50	9,68±0,70	1,44±0,13	0,17±0,01
	80	9,70±0,40	1,31±0,07	0,16±0,01

цент выноса отмечен для стронция-90, а наиболее низкий ($0{,}2 \cdot 10^{-3}$) — для церия-144.

Дерново-подзолистая почва. В серии опытов с дерново-подзолистой почвой изучали накопление стронция-90, цезия-137 и церия-144 растениями-мезофитами, поскольку, как показали результаты предыдущих опытов, между экологическими группами растений не оказалось заметных различий в накоплении излучателей.

Величина коэффициентов накопления всех трех радиоизотопов не зависит от влажности дерново-подзолистой почвы как по каждому виду в отдельности, так и в целом по экологической группе (табл. 5).

Вынос изученных радиоизотопов надземной массой растений определяется главным образом биомассой этих растений и соответственно увеличивается с повышением степени почвен-

Таблица 6

Вынос * радиоизотопов надземной массой растений в зависимости от влажности дерново-подзолистой почвы (% от внесенного в почву количества на 100 растений и *нкюри* на 1 *г* сухого вещества)

Влажность почвы, % от полной влагоемкости	Стронций-90		Цезий-137		Церий-144	
	10^{-3} %	*нкюри*	10^{-3} %	*нкюри*	10^{-3} %	*нкюри*
25	150	1502	16	298	2,0	30
50	170	1355	28	284	4,0	32
80	300	1358	31	257	4,5	30

* Усредненные данные по группе растений-мезофитов.

ного увлажнения (табл. 6). Из таблицы также следует, что вынос радиоизотопов растениями уменьшается в ряду: $Sr^{90} > Cs^{137} > Ce^{144}$.

Торфянисто-глеевая почва. На рис. 4 представлена зависимость между коэффициентами накопления стронция-90 и влажностью почвы. Накопление этого радионуклида всеми изученными видами растений уменьшается со снижением уровня увлажнения почвы, причем наиболее значительная разница наблюдается между величинами коэффициентов накопления вариантов опыта с избыточным и недостаточным увлажнением почвы. При влажности 50 и 25% от полной влагоемкости величина исследуемого показателя в большинстве случаев одинакова. Из рис. 4 также видно, что наиболее высокие значения

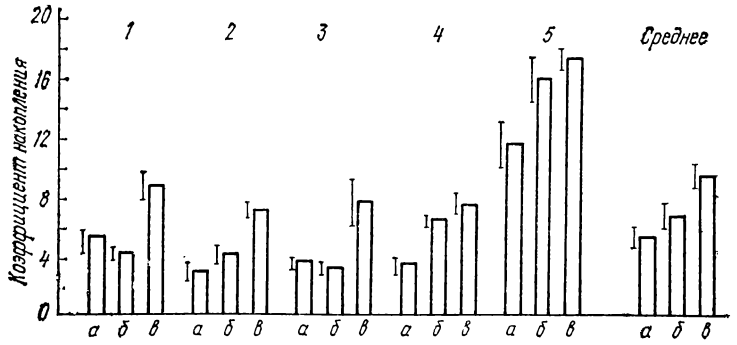


Рис. 4. Коэффициенты накопления стронция-90 для надземной массы растений в зависимости от влажности торфянисто-глеевой почвы. Черточками обозначены среднеквадратичные ошибки.

1 — овсяница луговая, *2* — овсяница тростниковая, *3* — овсяница красная, *4* — костер безостый, *5* — клевер луговой.

а, б, в — влажность почвы соответственно 25, 50, 80% от полной влагоемкости.

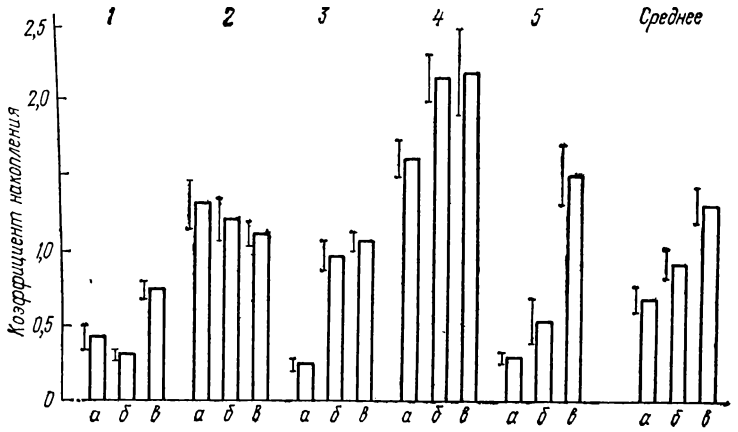


Рис. 5. Коэффициенты накопления цезия-137 для надземной массы растений в зависимости от влажности торфянисто-глеевой почвы. Обозначения те же, что и на рис. 4.

коэффициентов накопления стронция характерны для клевера лугового.

Опыт с цезием-137 показал, что накопление этого радионуклида, подобно накоплению стронция-90, в среднем по всей группе изучавшихся видов растений снижается с уменьшением влажности торфянисто-глеевой почвы (рис. 5). Степень влияния влажности почвы на величину коэффициентов накопления у разных видов растений различна. Так, наиболее значительно изменяются в зависимости от уровня почвенного увлажнения коэффициенты накопления у овсяницы красной и клевера лугового. Менее значительно они варьируют у овсяницы луговой и костра безостого. Концентрирующая способность овсяницы

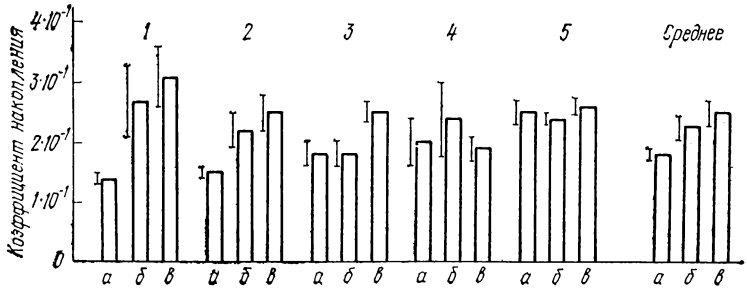


Рис. 6. Коэффициенты накопления церия-144 для надземной массы растений в зависимости от влажности торфянисто-глеевой почвы. Обозначения те же, что и на рис. 4.

Таблица 7

Вынос * радиоизотопов надземной массой растений в зависимости от влажности торфянисто-глеевой почвы (% от внесенного в почву количества на 100 растений и *нкюри* на 1 *г* сухого вещества)

Влажность почвы, % от полной влагоемкости	Стронций-90		Цезий-137		Церий-144	
	10^{-3} %	*нкюри*	10^{-3} %	*нкюри*	10^{-3} %	*нкюри*
25	80	492	12	146	2	36
50	160	616	20	192	5	46
80	220	868	31	245	6	50

* Усредненные данные по группе растений-мезофитов.

тростниковой в отношении цезия-137 остается постоянной при всех режимах увлажнения почвы. В наибольшем количестве цезий поступает в надземную массу костра безостого.

Снижение коэффициентов накопления церия-144 при недостаточном увлажнении торфянисто-глеевой почвы отмечено лишь у овсяниц луговой и тростниковой, у остальных видов растений они практически не изменяются (рис. 6).

В табл. 7 приведены данные, характеризующие вынос стронция-90, цезия-137 и церия-144 из торфянисто-глеевой почвы надземной массой растений. С повышением влажности почвы вынос радиоизотопов увеличивается в два-три раза. В разных вариантах опыта вынос элементов определяется не только биомассой растений, но и концентрацией изотопов в растениях, достигающей более высоких значений при избыточном увлажнении почвы.

В серии лабораторных опытов нами было показано, что с увеличением степени почвенного увлажнения концентрация стронция-90 в почвенном растворе уменьшается (см. статью Е. Н. Караваевой и др. в настоящем сборнике, стр. 9). При этом концентрация стронция-90 в надземной массе растений либо остается постоянной (опыты с дерново-луговой и дерново-подзолистой почвами), либо увеличивается (опыт с торфянисто-глеевой почвой). Отсутствие прямой зависимости поступления стронция-90 в растения от концентрации его в почвенном растворе указывает на то обстоятельство, что источником поступления стронция-90 в растения служит не только почвенный раствор, но и непосредственно почва, являющаяся основным депо радионуклида в системе почва — раствор — растение. Кроме того, в зависимости от влажности почвы изменяется концентрация в почвенном растворе стабильного изотопа кальция, что также может способствовать различному поступлению стронция-90 в растения.

Снижение концентрации цезия-137 и церия-144 в подопытных растениях при недостатке влаги в торфянисто-глеевой почве может быть отчасти объяснено соответствующим уменьшением концентрации этих элементов в почвенном растворе в интервале значений коэффициентов обводненности почвы 0,3—0,1 (см. статью Е. Н. Караваевой и др. в настоящем сборнике, стр. 5).

Увеличение общего выноса стронция-90, цезия-137 и церия-144 надземной массой растений происходит на фоне увеличения общего содержания радиоизотопов в почвенном растворе.

Таким образом, знание закономерностей поведения радиоизотопов в системе почва — раствор, особенностей перехода их из почвы в почвенный раствор в зависимости от режима почвенного увлажнения способствует лучшему пониманию поведения радиоизотопов в более сложной системе почва — растение.

Распределение стронция-90, цезия-137 и церия-144 в растениях в зависимости от влажности почв

В табл. 8 представлены данные по распределению стронция-90, цезия-137 и церия-144 между надземной массой и подземными частями растений в зависимости от влажности почв разных типов. Видно, что распределение радиоизотопов в растениях определяется лишь химическими свойствами излучателей и не зависит от влажности и типа почвы. Стронций преимущественно (82—94%) накапливается в надземной массе рас-

Таблица 8

Распределение радиоизотопов между надземной и подземной частями растений в зависимости от влажности почвы (% от содержания в целом растении; усредненные данные по группе растений-мезофитов)

Почва	Влажность почвы, % от полной влагоемкости	Стронций-90		Цезий-137		Церий-144	
		надземная	подземная	надземная	подземная	надземная	подземная
Дерново-луговая	25	83	17	55	45	10	90
	50	87	13	43	57	6	94
	80	89	11	53	47	11	89
Дерново-подзолистая	25	82	18	55	45	17	83
	50	83	17	35	65	14	86
	80	86	14	46	54	14	86
Торфянисто-глеевая	25	92	8	41	59	24	76
	50	91	9	38	62	21	79
	80	94	6	42	58	23	77

тений, цезий распределяется более или менее равномерно, а церий содержится в основном (76—90%) в подземной части растений. Следует обратить внимание на то обстоятельство, что корневому типу распределения элементов, представителем которого является церий, соответствуют наименьшие коэффициенты накопления в надземной массе растений; надземному типу распределения стронция, наоборот, соответствуют наивысшие коэффициенты накопления в надземной массе растений; коэффициенты накопления равномерно распределяющегося цезия соответствуют промежуточным значениям коэффициентов накопления церия и стронция. Отмеченная связь между характером распределения и коэффициентами накопления радиоизотопов является отражением барьерно-регулирующей функции корневой системы растений в процессах поглощения химических элементов из почвы и передвижения их в надземные органы.

Выводы

1. С повышением увлажнения исследованных почв от уровня влажности завядания до полной влагоемкости отмечено увеличение общего выноса стронция-90, цезия-137 и церия-144 надземной массой растений разных экологических групп. Такое увеличение выноса радиоизотопов определяется в основном возрастанием биомассы растений на более увлажненной почве.

2. Величина коэффициентов накопления радиоизотопов в надземной массе растений не зависит от влажности дерново-луговой и дерново-подзолистой почв. С уменьшением степени увлажнения торфянисто-глеевой почвы наблюдается некоторое снижение коэффициентов накопления изученных радиоизотопов.

3. Тип почвы и степень ее увлажнения не влияют на характер распределения излучателей в растениях. Стронций-90 во всех вариантах опытов преимущественно (до 94%) накапливается в надземной массе растений, церий-144 в подземных органах (до 90%), а цезий-137 распределяется более или менее равномерно между надземными и подземными частями растений.

ЛИТЕРАТУРА

Максимов Н. А., Александров В. Г. Продуктивность транспирации и засухоустойчивость.— Труды Тифлисского ботанического сада, 1917, № 19.

Миронов Б. А. Методика изучения влияния влажности почвы на миграцию радиоактивных изотопов в искусственных биогеоценозах.— Методы радиоэкологических исследований. М., Атомиздат, 1971.

Роде А. А. Основы учения о почвенной влаге, т. 1. Л., Гидрометеоиздат, 1965.

Харчук А. И., Абатуров Ю. Д. Влияние влажности почвы на величину накопления радионуклидов серы, стронция и цезия горохом.— IV Всесоюзный делегатский съезд почвоведов. Тезисы докладов, кн. 2, ч. 2, № 515, Алма-Ата, 1970.

Emmert F. H. Water utilisation and calcium-strontium uptake in Phaseolus vulgaris.— Physiol. Plant., 1963, vol. 17, N 3.

Pendleton R. C., Uhler R. L. Accumulation of cesium-137 by plants growen in simulated pond and irrigated field environments.— Nature, 1960, vol. 185, N 4714.

Schulz R. K., Moberg J. P., Overstreet R. Some experiments on the decontamination of soil containing strontium-90.— Hilgardia, 1959, N 28.

Stewart J. D., Hungate F. P. Affect of soil moisture on uptake and translocation of cesium-137, potassium, calcium-45 and strontium-85.— Radioecological Concentration Processes. L., Pergamon Press, 1967.

Tensho Kiyoshi, Yeh-Ko-Ling, Mitsui Schingo. The uptake of strontium and cesium by plants from soil with special reference to the unusual cesium uptake by lowland rice and its mechanism.— Soil a. Plant Food, 1961, vol. 6, N 4.

1975 | АКАДЕМИЯ НАУК СССР · УРАЛЬСКИЙ НАУЧНЫЙ ЦЕНТР
РАДИОЭКОЛОГИЧЕСКИЕ ИССЛЕДОВАНИЯ ПОЧВ И РАСТЕНИЙ

М. Г. НИФОНТОВА

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИЗУЧЕНИЕ НАКОПЛЕНИЯ ЦЕЗИЯ-137 ЛИШАЙНИКАМИ ИЗ ВОДНЫХ РАСТВОРОВ (На примере Cladonia rangiferina (L.) Web.)

Изучение роли различных представителей живых организмов в процессе миграции и распределения радиоактивных веществ по компонентам биогеоценозов — одна из актуальных проблем радиоэкологии. В этой связи большой интерес представляют лишайники, являющиеся в силу ряда морфофизиологических особенностей, активными аккумуляторами радионуклидов (Гродзинский, 1959; Субботина, Тимофеев-Ресовский, 1960; Рамзаев и др., 1971; Груздев, 1972; Tuominen, 1967; Larsson, 1970; Nevstrueva et. al., 1971; Ritchie et. al., 1971).

Поскольку в природной обстановке загрязнение лишайников радиоактивными веществами происходит преимущественно через атмосферные выпадения (Троицкая и др., 1971), важно оценить накопление радионуклидов этой группой организмов из водных растворов, близких по химическому составу к дождевой воде. В лабораторных условиях в качестве такой среды можно использовать дистиллят.

В настоящем сообщении представлены результаты опытов по изучению накопления одного из долгоживущих осколочных радионуклидов — цезия-137 слоевищами широко распространенного напочвенного лишайника *Cladonia rangiferina* в зависимости от физиологического состояния и биомассы лишайника в модельной системе.

Исследовалась способность к накоплению цезия-137 из растворов живыми и мертвыми слоевищами лишайника. Живые слоевища в одном варианте находились в воздушно-сухом состоянии (10—15% обводненности), в другом — в увлажненном (60—70% обводненности). Мертвые слоевища мы получали в результате выдерживания лишайников при температуре 130—150° С в течение 30 *ч*. Слоевища погружались в экспериментальные растворы цезия-137, приготовленные на дистил-

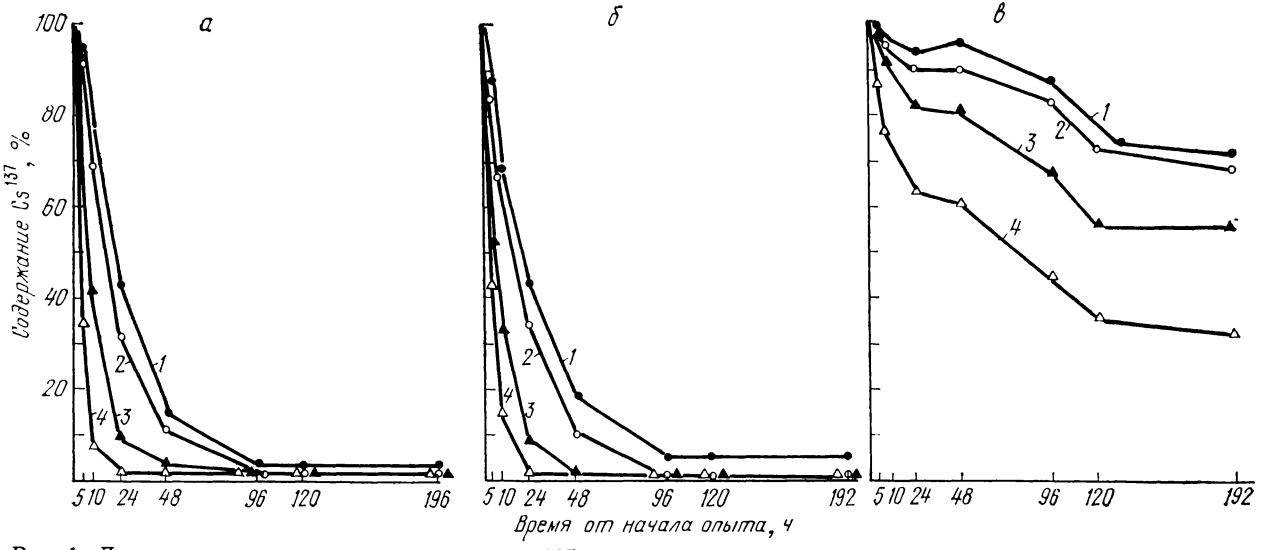


Рис. 1. Динамика изменения содержания цезия-137 в экспериментальных растворах (% к исходной концентрации раствора).

Слоевища: *а* — влажные; *б* — сухие; *в* — мертвые; *1—4* — биомасса лишайников, *г/л*: *1* — 0,66; *2* — 1,00; *3* — 2,00; *4* — 4,00.

лированной воде. Концентрация радионуклида в растворах 1,3—2,1 $\times 10^{-5}$ *кюри/л*. При этом биомасса лишайников составляла в разных вариантах 4,0; 2,0; 1,0 и 0,66 *г/л*. Повторность опытов была пятикратная. Пробы воды и слоевищ отбирали через 5, 10, 24, 48, 96, 120 и 196 *ч* после погружения лишайников в растворы. Растительные и водные пробы обрабатывались стандартным способом (Тимофеева-Ресовская, 1963), а содержание радионуклида в них определялось на радиометре типа «Волна» с торцовой трубкой БФЛ-Т-25 в четырех — пяти повторностях при статистической ошибке счета не более 5%. О накоплении цезия-137 лишайниками судили по его концентрации в слоевищах, в экспериментальном растворе и по коэффициентам накопления. Полученный цифровой материал обработан методом математической статистики с вычислением основных показателей (Плохинский, 1970; Митропольский, 1957).

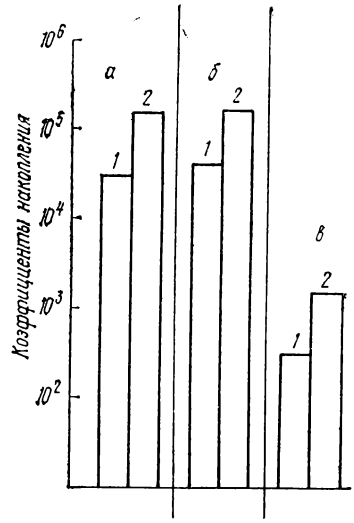


Рис. 2. Средние величины коэффициентов накопления цезия-137 у живых и мертвых слоевищ лишайников в пересчете на сырую (*1*) и сухую (*2*) массу.

Слоевища: *а* — влажные; *б* — сухие; *в* — мертвые.

Результаты экспериментов показывают, что живые слоевища лишайников довольно активно накапливают цезий-137. Через сутки после погружения талломов в растворах остается в зависимости от биомассы слоевищ от 2 до 43% радионуклида (рис. 1). К концу опыта (через восемь суток) лишайники сорбируют практически весь цезий-137 из растворов (97—99%). При этом влажные и сухие слоевища накапливают радиоцезий практически одинаково. Это подтверждается статистической обработкой данных: разница средних значений концентраций цезия-137 в сухих и влажных слоевищах через пять часов после начала эксперимента при биомассе слоевищ 4 *г/л* недостоверна (t=0,14). Аналогичные результаты получены при сравнении концентраций радионуклидов во влажных и сухих слоевищах во всех временных точках взятия проб и при всех значениях биомассы лишайников. Лишайники после термической обработки (мертвые слоевища) сорбируют цезий-137 менее интенсивно. Через сутки в растворах остается от 64 до 94% радионуклида, а к концу опыта 33—72% в зависимости от биомассы лишайников (см. рис. 1). Значения концентраций цезия-137 в мертвых слоевищах достоверно отличаются от концентраций радионуклида в сухих и влажных талломах (t=4,9 и 4,2 соответственно).

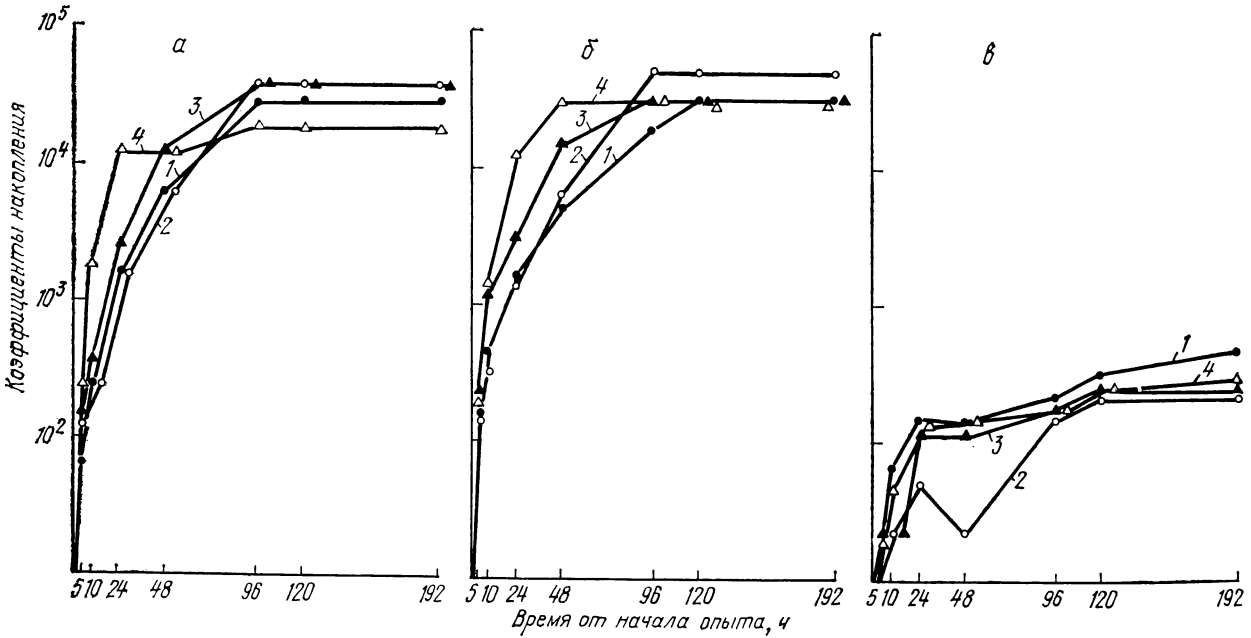


Рис. 3. Динамика изменения коэффициентов накопления цезия-137 у живых и мертвых слоевищ лишайника., Обозначения те же, что на рис. 1.

Как видно из рис. 2, коэффициенты накопления (КН) цезия-137 у лишайников достигают довольно больших значений. На четвертые сутки КН цезия-137 у живых лишайников в среднем составляют $4{,}8—5{,}4 \cdot 10^4$ и достоверно не различаются у сухих и влажных слоевищ. КН цезия-137 у мертвых талломов составляют в среднем $3—7 \cdot 10^2$ и отличаются от КН живых лишайников на два порядка величин независимо от способа их расчета.

Динамика КН цезия-137 у живых и мертвых слоевищ представлена на рис. 3. Примерно на четвертые сутки после погружения талломов в растворы КН цезия-137 у них стабилизируются, не изменяются до конца опыта и не зависят от биомассы лишайников.

Выводы

1. Накопление цезия-137 лишайниками не зависит от степени первоначального их увлажнения.
2. Коэффициенты накопления радионуклида у мертвых лишайников на два порядка величин ниже, чем у живых (влажных и сухих) слоевищ.
3. Скорость поглощения цезия-137 находится в прямой зависимости от биомассы лишайника в водной среде.

ЛИТЕРАТУРА

Гродзинский Д. М. О естественной радиоактивности мхов и лишайников.— Укр. бот. ж., 1959, т. 16, № 2.

Груздев Б. Н. Естественные и искусственные радиоактивные элементы в растениях некоторых природных биогеоценозов Северо-Востока европейской части СССР. Автореф. дисс. М., 1972.

Митропольский А. К. Элементы статистического исчисления. Л., 1957 (Лесотехн. ин-т).

Плохинский Н. А. Биометрия. М., Изд-во МГУ, 1970.

Рамзаев П. В., Ибатуллин М. С., Крисюк Э. М., Лисаченко Э. П., Литвер Б. Я., Нижников А. И., Троицкая М. Н. Методы исследования миграции радиоактивных изотопов в цепочке лишайник — северный олень — человек.— Методы радиоэкологических исследований. М., Атомиздат, 1971.

Субботина Е. Н., Тимофеев-Ресовский Н. В. О коэффициентах накопления некоторых рассеянных элементов из водных растворов накипным лишайником.— Бот. ж., 1960, т. 46, № 2.

Тимофеева-Ресовская Е. Н. Распределение радиоизотопов по основным компонентам пресноводных водоемов.— Труды Ин-та биологии УФАН СССР, 1963, вып. 30.

Троицкая М. Н., Рамзаев П. В., Моисеев А. А., Нижников А. И., Бельцев Д. И., Ибатуллин М. С., Литвер Б. Я., Дмитриев И. М. Радиоэкология ландшафтов Крайнего Севера.— Радиоэкология, т. 2. М., Атомиздат, 1971.

Larsson J. E. Cs^{137} in lichen communities on the Baltie coast.— Svensk bot. tidsk., 1970, vol. 64, N 2.

Nevstrueva M. A., Ramzaev P. V., Moiseev A. A., Ibatullin M. S., Teplykh L. A. The nature of Cs^{137} and Sr^{90} transport over the lichen-reindeer-men food chein.— Radioecological concentration Processes. Oxford, 1971.

Tuominen J. Studies on the strontium uptake of the Cladonia alpestris thallus.— Ann. bot. fenniai, 1967, vol. 4, N 1.

Ritchie C. A., Ritchie J. C., Plummer G. L. Distribution of fallout cesium-137 in Cladonia mounds in Georgia.— Briologist, 1971, vol. 74, N 3.

С. В. ТАРЧЕВСКАЯ, П. И. ЮШКОВ

НАКОПЛЕНИЕ И БИОЛОГИЧЕСКОЕ ДЕЙСТВИЕ СТРОНЦИЯ-90 НА РАННИХ СТАДИЯХ РАЗВИТИЯ *Pinus silvestris* L.

Изучение биологического действия радиоизотопов на сеянцы хвойных пород, их накопление и распределение в растениях входит в круг задач лесной радиоэкологии (Алексахин и др., 1970). Для получения информации подобного рода необходимы модельные эксперименты, имитирующие загрязнение леса радионуклидами и связанное с этим облучение подроста в широком диапазоне доз.

В настоящей работе представлены результаты опытов по изучению влияния стронция-90, при разных уровнях содержания его в почве, на рост и развитие сеянцев сосны обыкновенной.

Расчетные значения поглощенных доз, накопленных различными частями сеянцев сосны в течение опыта при разных уровнях содержания стронция-90 в почве, *рад*

Содержание стронция-90 в почве, *мкюри/кг*	Возраст сеянцев, месяцы						
	1,5	3	12	14	24	26	38
0,001	0,7* / 1,4	1,2 / 2,4	5 / 10	6 / 12	10 / 20	11 / 22	15 / 30
0,01	7,0 / 14	12 / 24	50 / 100	60 / 120	100 / 200	100 / 220	150 / 300
0,1	70 / 140	120 / 240	500 / 1000	600 / 1200	1000 / 2000	1100 / 2200	1500 / 3000
1,0	700 / 1400	1270 / 2400	5000 / 10200	— / —	— / —	— / —	— / —

* В числителе данные по верхушечной почке, в знаменателе — по корневой части.

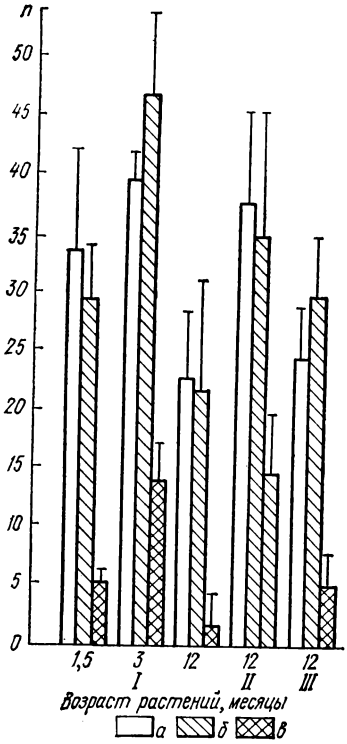


Рис. 1. Развитие ассимиляционных органов и корневой системы сеянцев сосны при различном содержании стронция-90 в почве. (*n* — число хвоинок и корешков на одно растение).
I — первичная хвоя; *II* — парная хвоя; *III* — боковые корни.
а — контроль; *б* — 0,1 *мкюри/кг*; *в* — 1,0 *мкюри/кг*.

Наряду с этим приводятся данные по накоплению этого излучателя растениями.

Опыты проводились по следующей методике. Деревянные ящики (20×20×20 *см*) наполнялись просеянной дерново-луговой почвой, равномерно перемешанной с раствором хлорида стронция-90. Концентрация радионуклида в различных вариантах опыта составляла 0,001; 0,01; 0,1 и 1,0 *мкюри* на 1 *кг* воздушно-сухой почвы. В контрольном варианте стронций-90 в почву не вносился. В каждый из ящиков высевали по 100 штук покоящихся семян сосны; в дальнейшем на протяжении четырех вегетационных сезонов проводили наблюдения за развитием растений. Дважды в течение каждого вегетационного сезона отбирали пробы почвы и растений для радиометрического определения содержания в них радионуклида. Радиоактивность образцов почвы и зольных препаратов растений измеряли на радиометре типа Б-3 с помощью торцовой трубки БФЛ-Т-25 при статистической ошибке счета не свыше 5%. Кроме того, у сеянцев измеряли длину хвоинок, гипокотилей, верхушечных побегов и корней, а также учитывали количество хвоинок, боковых корней и определяли вес сухой массы растений. Опыты проводились в трех повторностях. Для биометрии и радиометрии из каждой повторности опыта отбирали по три средних образца.

Полученные радиометрические данные использовали для расчета доз внешнего облучения (см. таблицу) верхушечной почки и корней сеянцев (Горшков, 1967). Доза внутреннего облучения, вследствие ее малого вклада в общую дозу (Карабань, Тихомиров, 1967), в расчет не принималась.

Результаты опыта показали, что при концентрации стронция-90 1 *мкюри/кг* почвы уже на самых ранних стадиях развития сеянцев проявилось угнетающее влияние излучателя: верхушечные почки, верхушечные побеги и первичная хвоя у этих

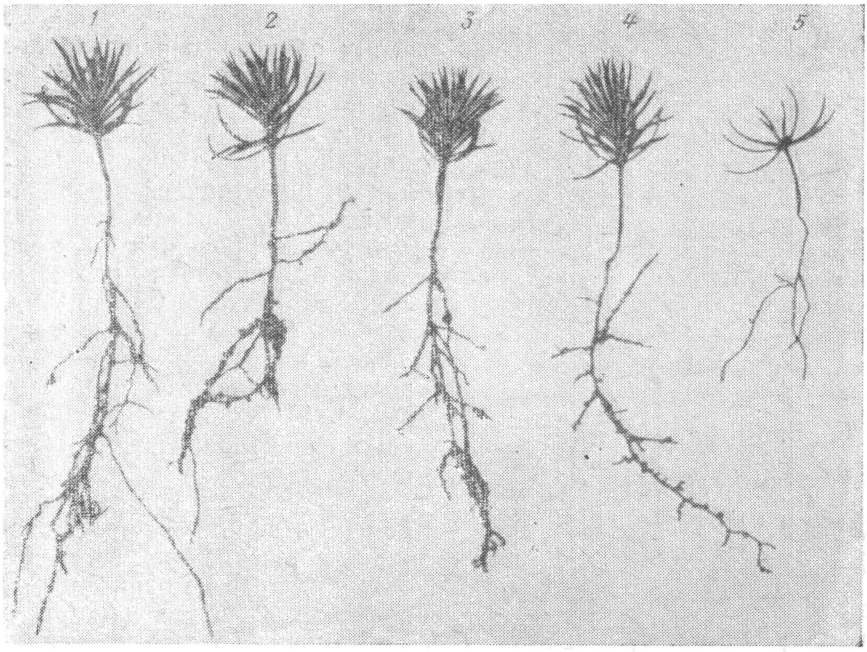


Рис. 2. Внешний вид 3-месячных сеянцев в различных вариантах опыта.
1 — контроль, без внесения Sr^{90}; *2—5* — концентрация Sr^{90} в почве, *мкюри/кг*: *2* — 0,001; *3* — 0,01; *4* — 0,1; *5* — 1,0.

растений появились на 5—14 дней позднее, чем в контроле. Количество первичных хвоинок у сеянцев опытного варианта в возрасте от полутора до трех месяцев было в 2,5—6 раз меньше, чем у необлученных растений (рис. 1). Кроме того, корневая система опытных растений была лишена микоризы, резко снижалось ветвление корней, корневые окончания были несколько утолщены (рис. 2). Подобные симптомы поражения наблюдались нами у сеянцев сосны обыкновенной при хроническом облучении их в дозе 50 *рад/сутки* в условиях гамма-поля (Юшков, Тарчевская, 1968).

Поглощенная доза, накопленная верхушечной почкой и корнями сеянцев этого варианта опыта за полтора месяца, составляла 700 и 1400, а за три месяца 1270 и 2500 *рад*, соответственно. В опытах с поверхностным загрязнением почвы радиоактивным стронцием, когда облучению подвергались лишь надземная часть и корневая шейка сеянцев сосны обыкновенной, заметное угнетение роста растений отмечено при величине поглощенной дозы для верхушечной почки 2000—2500 *рад* (Карабань, Тихомиров, 1968). Проявление лучевого эффекта при более низких поглощенных дозах у сеянцев сосны в наших опытах

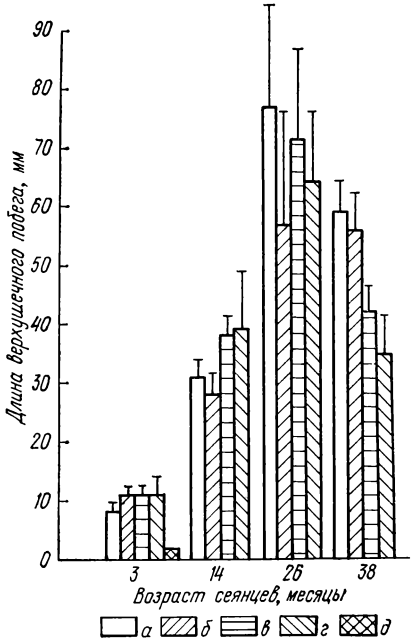


Рис. 3. Прирост сеянцев сосны в разных вариантах опыта.

Концентрация Sr^{90}, *мкюри/кг*: *а* — контроль, *б* — 0,001, *в* — 0,01, *г* — 0,1, *д* — 1,0.

объясняется тем, что одновременно подвергались хроническому облучению как надземная часть, так и корневая система растений. После перезимовки доза облучения растений, произраставших в сосудах с концентрацией стронция-90 1 *мкюри/кг* почвы, достигла летального уровня, и на фоне полного отсутствия ростовых явлений, резкого уменьшения, по сравнению с контролем, количества хвои и подавления роста и ветвления корней (см. рис. 1, 2) была зарегистрирована гибель однолетних сеянцев.

При меньшей концентрации радиоизотопа в почве рост растений в течение трех вегетационных сезонов не отличался от контроля. В конце четвертого вегетационного сезона в вариантах с концентрацией стронция-90 0,1 и 0,01 *мкюри/кг* почвы было отмечено достоверное уменьшение прироста сеянцев в высоту (рис. 3). По длине корней сеянцы всех вариантов опыта не отличались друг от друга, хотя к концу четвертого вегетационного сезона ветвление корней и образование микоризы в вариантах с внесением стронция-90 в почву были явно заторможены; ярко выражена «голоствольность» сеянцев из-за полного отсутствия первичной и парной хвои (рис. 4).

Особенно четко отрицательный радиобиологический эффект заметен при анализе данных, характеризующих воздушно-сухой вес отдельных органов растений. Из рис. 5 видно, что к концу четвертого вегетационного сезона наибольшие отличия в воздушно-сухом весе отдельных органов сеянцев наблюдаются в вариантах с концентрацией стронция-90 0,1 и 0,01 *мкюри/кг* почвы. В частности, вес надземной массы и верхушечных побегов четвертого года жизни сеянцев этих вариантов в 3—3,7 раза меньше, чем в контроле. При сравнении общего веса хвои третьего и четвертого года жизни разница между контролем и опытными вариантами (0,1 и 0,01 *мкюри/кг* почвы) возрастает в три — девять раз.

Если в варианте с концентрацией стронция-90 0,1 *мкюри*

поглощенная доза, накопленная верхушечной почкой и корнями сеянцев к концу четвертого вегетационного сезона, являлась достаточно большой, чтобы вызвать вышеназванные нарушения в росте сеянцев (табл. 1), то при концентрации излучателя 0,01 *мкюри/кг* почвы дозы облучения в 150 и 300 *рад* для верхушечной почки и корней соответственно лежат ниже предела подавляющих доз, установленных нами для хвойных растений при гамма-облучении воздушно-сухих семян и вегетирующих сеянцев (Юшков, Тарчевская, 1968; Тарчевская, Юшков, 1970; Тарчевская, 1970). Наряду с этим в радиобиологической литературе имеются сведения, указывающие на достаточно низкие, подавляющие рост сеянцев хвойных пород, дозы облучения (Гайлис, 1965; Карабань, Тихомиров, 1968).

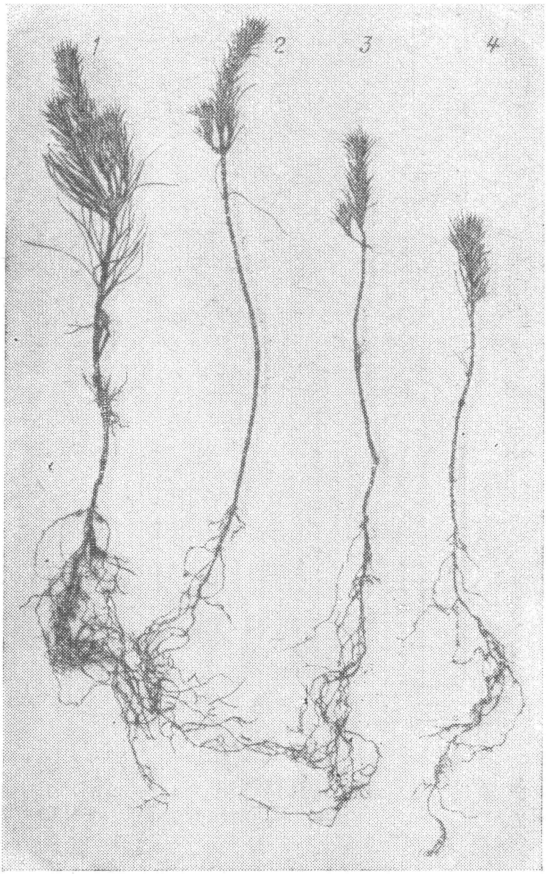


Рис. 4. Внешний вид трехлетних сеянцев сосны, выросших на почвах с различной концентрацией стронция-90.
Обозначения те же, что и на рис. 2.

Из результатов опыта следует, что действие радиоактивного загрязнения на сеянцы сосны обыкновенной проявляется по истечении определенного промежутка времени, необходимого для накопления поглощенной дозы, вызывающей тот или иной эффект, при этом величина эффективной дозы в значительной степени зависит от мощности облучения.

По-видимому, наряду с непосредственным подавлением деления клеток под действием длительного облучения и связанного с этим снижения ростовых процессов в различных органах

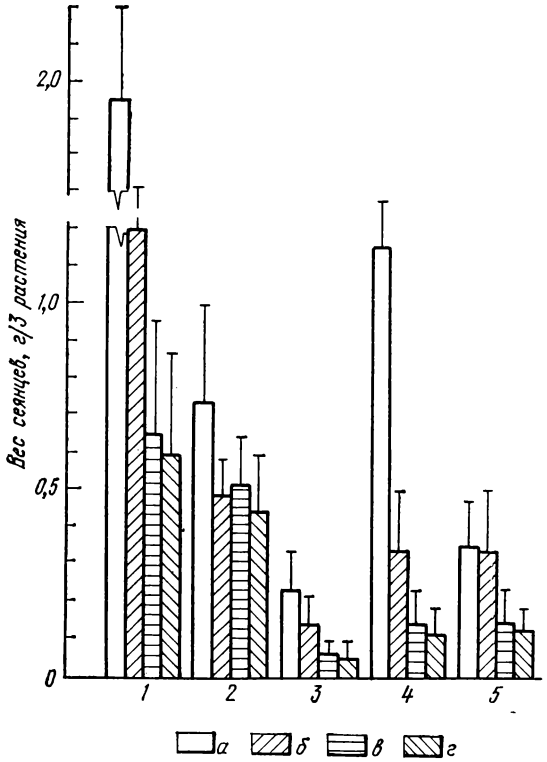


Рис. 5. Воздушно-сухой вес различных органов у сеянцев сосны в конце четвертого вегетационного сезона при разных уровнях содержания стронция-90 в почве.

Концентрация Sr^{90}, *мкюри/кг*: *а* — контроль, *б* — 0,001, *в* — 0,01, *г* — 0,1.
1 — надземная часть; *2* — корни; *3* — верхушечный побег; *4* — хвоя 3-го года жизни сеянцев; *5* — хвоя 4-го года жизни сеянцев.

сеянцев, одновременно происходит изменение характера поглощеня тех или иных химических элементов растением.

Иллюстрацией к вышесказанному служат данные по распределению стронция-90 в сеянцах между надземными частями и корнями растений (рис. 6). Можно заметить, что относительно большее количество стронция-90 находится в надземных органах сеянцев, которые, по убыванию в них содержания радиоизотопа, располагаются в ряду: хвоя — верхушечный побег — гипокотиль. Надземный тип распределения стронция-90 в растениях отмечен рядом авторов и у других видов растений (Гулякин, Юдинцева, 1962; Махонина, 1968; Караваева и др., 1970). Приведенные данные показывают также, что во всем изучавшемся интервале концентраций стронция-90 в почве характер распределения его между различными органами растений не изменяется на протяжении трех вегетационных сезонов. При проявлении признаков лучевого поражения растений в вариантах с концентрацией стронция-90 в почве 0,01 и 0,1 *мкюри* намечается снижение относительного содержания излучателя в надземных частях и соответственное увеличение его в корневой системе.

Абсолютное содержание стронция-90 (рис. 7) возрастает во времени с увеличением биомассы сеянцев (некоторое снижение его на третьем году жизни растений объясняется естественным опадом первичной и парной хвои во всех вариантах опыта),

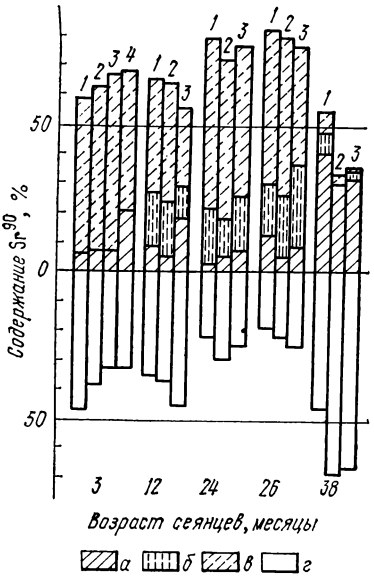


Рис. 6. Распределение стронция-90 по органам сеянцев сосны разного возраста.

а — гипокотиль, *б* — верхушечный побег, *в* — хвоя, *г* — корень. Концентрация Sr^{90} в почве, *мкюри/кг*: *1* — 0,001; *2* — 0,01; *3* — 0,1; *4* — 1,0.

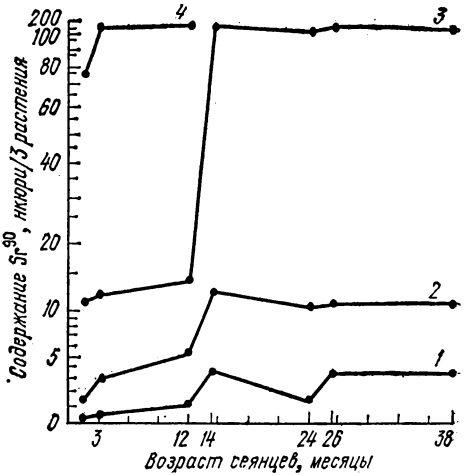


Рис. 7. Изменение содержания стронция-90 в сеянцах сосны различных вариантов в течение опыта.

Обозначения те же, что и на рис. 6.

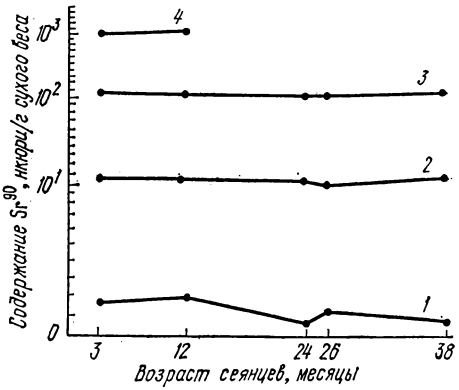


Рис. 8. Концентрация стронция-90 в сеянцах сосны.

Обозначения те же, что и на рис. 6.

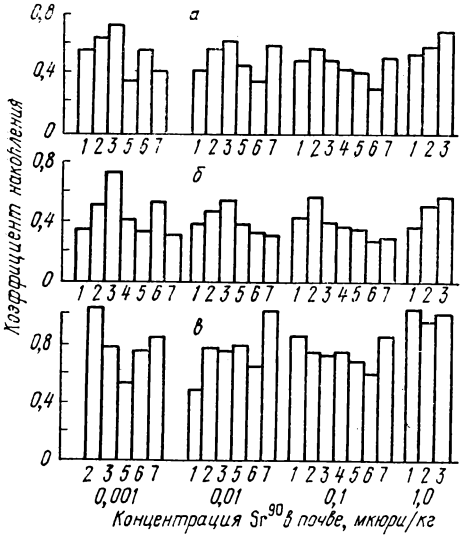


Рис. 9. Коэффициенты накопления стронция-90 у различных частей и целых сеянцев сосны, выросших на почвах с разным содержанием в ней радионуклида. *а* — целое растение, *б* — надземная часть, *в* — корни.
Возраст сеянцев, мес.: *1* — 1,5; *2* — 3; *3* — 12; *4* — 14; *5* — 24; *6* — 26; *7* — 38.

при этом накопление стронция-90 в молодых сеянцах находится в прямой зависимости от содержания его в почве (рис. 8). Величина же коэффициентов накопления радионуклида в растении (рис. 9) практически не зависит от концентрации его в почве, а также от возраста сеянцев.

Выводы

1. При концентрации стронция-90 в 1 *мкюри/кг* почвы происходит сильное угнетение и задержка роста молодых сеянцев сосны с летальным исходом на второй год после посева семян. При меньшей концентрации излучателя в почве (0,1 и 0,01 *мкюри/кг*) угнетающее действие сказывается на четвертом году жизни сеянцев, без летального исхода. В варианте с концентрацией стронция-90 в почве 0,001 *мкюри/кг* за время опыта рост и развитие сеянцев не отличались от контроля.

2. Суммарное содержание стронция-90 в надземных частях сеянцев несколько выше, чем в корнях. Лишь у растений с явными признаками лучевого поражения характер распределения радионуклида изменяется.

3. Накопление стронция-90 в растениях находится в прямой зависимости от содержания его в почве. При этом коэффициенты накопления радионуклида остаются постоянными и не зависят от возраста сеянцев.

ЛИТЕРАТУРА

Алексахин Р. М., Тихомиров Ф. А., Куликов Н. В. Состояние и задачи лесной радиоэкологии.— Экология, 1970, № 1.

Гайлис Я. Я. Влияние ионизирующих излучений на всхожесть семян и выход сеянцев сосны и ели.— Ионизирующие излучения в биологии. Рига, «Зинатне», 1965.

Горшков Г. В. Проникающие излучения радиоактивных источников. Л., «Наука», 1967.

Гулякин И. В., Юдинцева Е. В. Радиоактивные продукты деления в почве и растениях. М., Госатомиздат, 1962.

Карабань Р. Т., Тихомиров Ф. А. Влияние радиоактивного загрязнения почвы на сеянцы сосны и ели.— Радиобиология, 1967, т. 7, вып. 2.

Карабань Р. Т., Тихомиров Ф. А. Радиобиологическое действие Sr^{90} и Cs^{137} на сеянцы сосны, ели и лиственницы.— Лесоведение, 1968, № 2.

Караваева Е. Н., Куликов Н. В., Молчанова И. В. Накопление Sr^{90}, Cs^{137} и Ce^{144} растениями в зависимости от влажности почвы.— Информ. бюлл. «Радиобиология», 1970, т. 10, вып. 3.

Махонина Г. И. Распределение некоторых радиоизотопов в сеянцах сосны обыкновенной.— Труды Ин-та экологии растений и животных УФАН СССР, 1968, вып. 61.

Тарчевская С. В. Влияние гамма-лучей кобальта-60 на семена некоторых видов хвойных растений.— Труды Ин-та экологии растений и животных УФАН СССР, 1970, вып. 74.

Тарчевская С. В., Юшков П. И. Влияние предпосевного облучения семян на развитие сеянцев сосны обыкновенной.— Труды Ин-та экологии растений и животных УФАН СССР, 1970, вып. 74.

Юшков П. И., Тарчевская С. В. Ионизирующая радиация и основные лесообразующие породы Урала.— Леса Урала и хозяйство в них. Матер. зон. конф. по лесн. хоз-ву. Свердловск, 1968.

1975 АКАДЕМИЯ НАУК СССР · УРАЛЬСКИЙ НАУЧНЫЙ ЦЕНТР
РАДИОЭКОЛОГИЧЕСКИЕ ИССЛЕДОВАНИЯ ПОЧВ И РАСТЕНИЙ

П. И. ЮШКОВ, С. В. ТАРЧЕВСКАЯ, Н. В. КУЛИКОВ

БИОЛОГИЧЕСКОЕ ДЕЙСТВИЕ Sr^{90} НА СЕЯНЦЫ СОСНЫ (Pinus silvestris L.) В ЗАВИСИМОСТИ ОТ ВЕРТИКАЛЬНОГО РАСПРЕДЕЛЕНИЯ РАДИОНУКЛИДА В ПОЧВЕ

В работах ряда авторов (Карабань, Тихомиров, 1967; Alexakhin et al., 1969) показана сравнительно высокая радиационная поражаемость всходов хвойных растений на почвах, загрязненных $Sr^{90}+Y^{90}$. При прогнозировании возобновления хвойных растений на участках с поверхностным загрязнением почвы необходимо учитывать, что даже спустя несколько лет после попадания радионуклида на поверхность почвы в верхнем 5-сантиметровом слое его остается до 98% (Миронов, 1971; Молчанова и др., 1971; Тихомиров, 1972). Поэтому в случае поверхностного загрязнения территории в качестве меры по снижению повреждающего действия радиостронция на сеянцы сосны было предложено перемешивание верхнего почвенного слоя с нижележащими слоями на глубину 10—12 *см* (Карабань, Тихомиров, 1971).

В настоящей работе нами рассматривается влияние концентрации стронция-90 в почве и распределения его по почвенному профилю на всхожесть семян, развитие сеянцев сосны и накопление ими радионуклида.

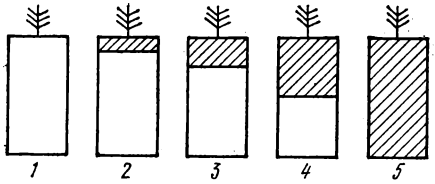


Рис. 1. Схема опыта. (Заштрихован слой почвы, содержащий Sr^{90}.)

1 — контроль, без внесения в почву Sr^{90}; *2—5* — внесение Sr^{90} в слой почвы толщиной, *см*: *2* — 2; *3* — 5; *4* — 10; *5* — 20.

Для проведения опытов использовали глиняные вегетационные сосуды, вмещавшие по шести килограммов смеси дерново-луговой почвы с песком (1 : 1 по весу). Стронций-90 вносили в виде раствора $Sr^{90}Cl_2$ по 600 *мкюри* на один сосуд в почвенные слои разной толщины из расчета 15 *мккюри/м*^{2}. В первом варианте

толщина радиоактивного слоя составляла 2, во втором — 5, в третьем — 10 и в четвертом — 20 *см* при концентрации радионуклида в слое внесения 1,0; 0,4; 0,2 и 0,1 *мккюри* на 1 *кг* воздушно-сухой почвы соответственно. Вариант без внесения стронция-90 служил контролем. Повторность опыта 3—6-кратная. Схема опыта приведена на рис. 1.

В первом опыте посев семян сосны проводился в начале июня, а во втором — в конце сентября. В каждый сосуд высевали по 50 штук семян. После посева сосуды помещали на открытой площадке в специальные траншеи для предохранения от взаимного облучения и резких перепадов температуры. В этом опыте часть растений убрали в год посева (в конце сентября), а конечную уборку произвели во второй половине августа следующего года, т. е. через 14 месяцев после появления всходов.

Во втором опыте растения были убраны в августе следующего года через 50 дней после появления всходов.

Расчет доз облучения семян и точек роста стеблей производили по формуле:

$$P_{Sr^{90}+Y^{90}}=3{,}7\cdot10^{-3}\cdot0{,}5q\cdot\frac{0{,}2}{57{,}5}\cdot\Phi_{Sr^{90}}(\mu h)+\frac{0{,}89}{9{,}2}\cdot\Phi_{Y^{90}}(\mu h),$$

где P — мощность дозы, *рад/сек*; q — удельная радиоактивность почвы, *мккюри/г*; $\Phi(\mu h)$ — функция Кинта, в которой μ — коэффициент ослабления β-излучения в воздухе, $см^{-1}$; h — высота над поверхностью почвы, *см*.

Во время разборки опытов корневую систему растений отделяли от почвы и тщательно отмывали, после чего каждый сеянец сосны разделяли на хвою, верхушечный побег, гипокотиль и корни. Высушенные до воздушно-сухого состояния растительные образцы сжигали в муфельной печи при температуре 500°, а в зольных препаратах определяли содержание $Sr^{90}+Y^{90}$ при помощи счетчика БФЛ-Т-25 на пересчетной установке ППС-100. Ошибка счета не превышала 3%.

РЕЗУЛЬТАТЫ ОПЫТА С ВЕСЕННИМ ПОСЕВОМ СЕМЯН

Почти во всех вариантах опыта семена сосны, посеянные 12 июня, дали всходы через 20 дней. Исключение составил лишь вариант с толщиной радиоактивного слоя почвы 2 *см*, в котором всходы появились на четыре дня позднее.

Из табл. 1 видно, что семена в вариантах с радиоактивным слоем почвы 2 и 5 *см* к моменту появления всходов накопили дозы облучения 660 и 220 *рад*, что привело к снижению их всхожести соответственно в 3 и 2 раза по сравнению с контролем. В вариантах с большей толщиной радиоактивного слоя почвы, но с меньшей концентрацией в ней стронция-90, всхожесть семян мало отличалась от контроля.

Таблица 1

Всхожесть семян и выживаемость сеянцев сосны в зависимости от вертикального распределения стронция-90 в почве (посеяно 12 июня, уборка сеянцев произведена через 3 месяца после появления всходов)

Толщина радиоактивного слоя почвы, *см*	Концентрация Sr^{90}, *мкюри/кг* почвы	Доза облучения семян, *рад*	Всхожесть, %	Доза облучения точки роста сеянцев, *рад*	Количество погибших сеянцев, %
Контроль	0	0	54	0	4
2	1,0	660	12	1950	100
5	0,4	220	26	760	26
10	0,2	110	42	380	15
20	0,1	50	50	190	3

К концу сентября сеянцы сосны в сосудах со слоем радиоактивной почвы 2 *см* полностью погибли, а в сосудах со слоем радиоактивной почвы 5 *см* гибель их составила 26%. Значительный отпад сеянцев наблюдался и в сосудах с толщиной радиоактивного слоя почвы 10 *см*. В сосудах с равномерным распределением стронция-90 по всему объему почвы (толщина радиоактивного слоя 20 *см*) гибель сеянцев находилась на уровне контрольного варианта и составляла 3%. Рассмотренные данные показывают, что процент отпада сеянцев в сосудах с разным распределением стронция-90 в почвенном профиле обусловлен в основном величиной суммарной дозы облучения, полученной растениями в процессе вегетации.

По длине корней и гипокотилей 3-месячные сеянцы не отличались друг от друга, тогда как длина верхушечного побега у сеянцев в сосудах с радиоактивным слоем почвы в 5 и 10 *см* была ниже, чем в контроле (рис. 2). У этих же сеянцев оказался меньший, чем в контроле, сухой вес хвои и корней, что обусловлено сильным угнетением образования ювенильной хвои и ветвления корней. Вес стеблей у сеянцев этого возраста во всех вариантах опыта мало отличался от контроля (рис. 3).

Как указывалось выше, в первом опыте часть сосудов с сеянцами была оставлена до конца сентября следующего года. В этом случае отпад сеянцев в сосудах с равномерным распределением стронция-90 по всему объему почвы оказался одинаковым по величине с отпадом в контроле (табл. 2). За два вегетационных сезона в сосудах с радиоактивным слоем почвы

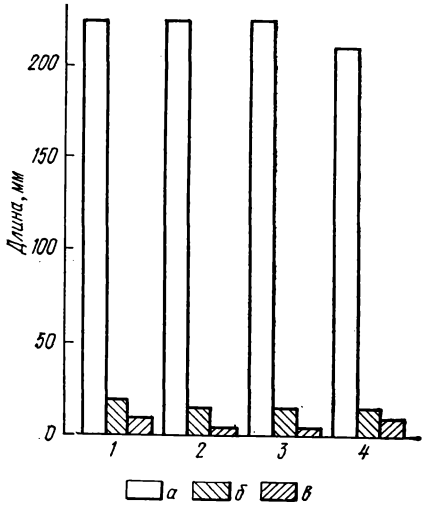


Рис. 2. Средняя длина осевых органов у 3-месячных сеянцев сосны при разном распределении Sr^{90} в почве.

1 — контроль (без внесения Sr^{90} в почву); внесение Sr^{90} в слой почвы толщиной, *см*: *2* — 5, *3* — 10, *4* — 20.
а — корень; *б* — гипокотиль; *в* — верхушечный побег.

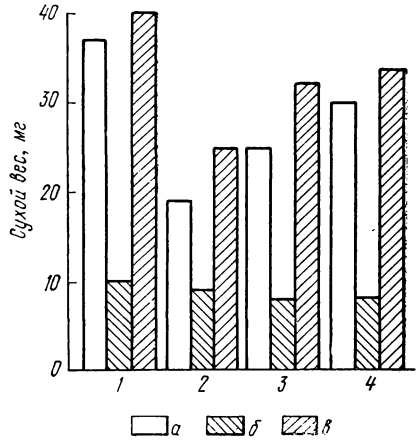


Рис. 3. Средний вес отдельных органов у 3-месячных сеянцев сосны при разном распределении Sr^{90} в почве.

1 — контроль (без внесения Sr^{90} в почву); внесение Sr^{90} в слой почвы толщиной, *см*: *2* — 5, *3* — 10, *4* — 20.
а — корень, *б* — стебель; *в* — хвоя.

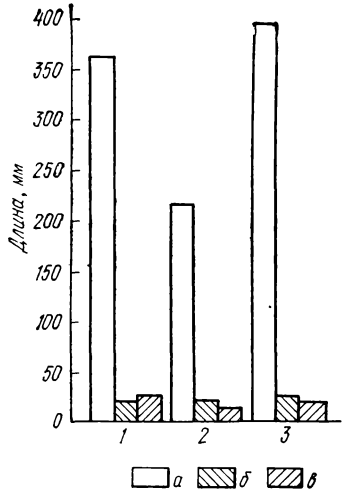


Рис. 4. Средняя длина осевых органов у 14-месячных сеянцев сосны при разном распределении Sr^{90} в почве.

1 — контроль (без внесения Sr^{90} в почву); внесение Sr^{90} в слой почвы толщиной, *см*: *2* — 10, *3* — 20.
а — корень; *б* — стебель; *в* — верхушечный побег.

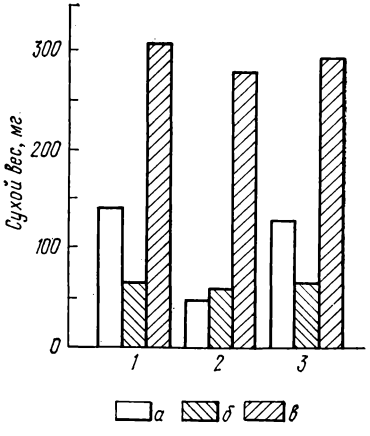


Рис. 5. Средний вес отдельных органов у 14-месячных сеянцев сосны при разном распределении Sr^{90} в почве.

1 — контроль (без внесения Sr^{90} в почву); внесение Sr^{90} в слой почвы толщиной, *см*: *2* — 10, *3* — 20.
а — корень; *б* — стебель; *в* — хвоя.

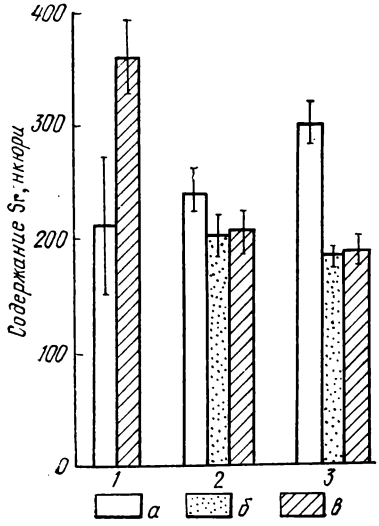


Рис. 6. Накопление Sr^{90} 3-месячными сеянцами сосны при разном распределении радионуклида в почве (*нкюри/г* сухого вещества). Здесь и на других рисунках в качестве показателя статистической вариабельности экспериментальных данных приведена квадратическая ошибка средней величины.

Внесение Sr^{90} в слой почвы толщиной, *см*; *1* — 5; *2* — 10; *3* — 20.
а — корень; *б* — стебель; *в* — хвоя.

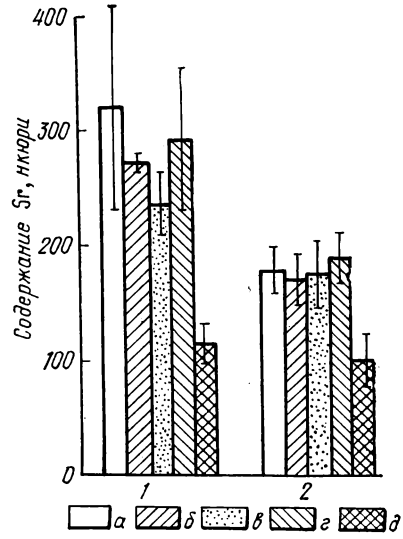


Рис. 7. Накопление Sr^{90} 14-месячными сеянцами сосны при разном распределении радионуклида в почве (*нкюри/г* сухого вещества).

Внесение Sr^{90} в слой почвы толщиной: *1* — 10 *см*, *2* — 20 *см*.
а — корень, *б* — гипокотиль, *в* — верхушечный побег (без хвои), *г* — ювенильная хвоя, *д* — парная хвоя.

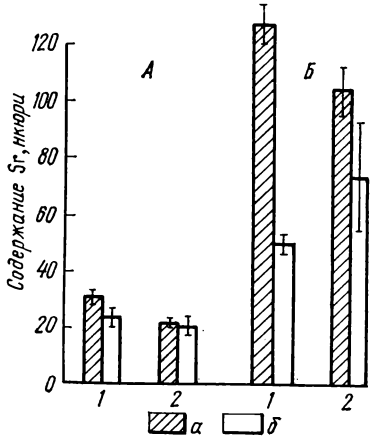


Рис. 8. Содержание Sr^{90} в надземных органах (*а*) и корнях (*б*) сеянцев сосны при разном распределении радионуклида в почве (*нкюри* на 1 растение).

Внесение Sr^{90} в слой почвы толщиной: *1* — 10 *см*, *2* — 20 *см*.
Возраст сеянцев: *А* — 3 и *Б* — 14 месяцев.

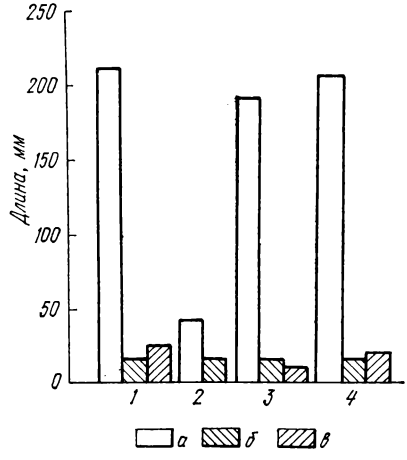


Рис. 9. Средняя длина осевых органов 50-дневных сеянцев сосны при разном распределении Sr^{90} в почве (посев в сентябре, появление всходов в мае — июне следующего года).

1 — контроль (без внесения Sr^{90} в почву); внесение Sr^{90} в слой почвы толщиной, *см*: *2* — 5, *3* — 10, *4* — 20.
а — корень; *б* — стебель; *в* — верхушечный побег.

5 и 10 *см* дозы облучения точек роста стеблей сеянцев составили 2540 и 1270 *рад*, что привело к гибели соответственно 88 и 51% всех сеянцев. Сохранившиеся к концу опыта сеянцы в сосудах с радиоактивным слоем почвы 5 *см* имели хвою, но к осени не образовали почек и были, в конечном счете, нежизнеспособны.

Таблица 2

Выживаемость сеянцев сосны в зависимости от вертикального распределения стронция-90 в почве (посев — 12 июня, уборка — через 14 месяцев после появления восходов)

Толщина радиоактивного слоя почвы, *см*	Концентрация стронция-90, *мкюри/кг* почвы	Доза облучения точки роста сеянцев, *рад*	Количество погибших сеянцев, %
Контроль	0	0	8
5	0,4	2540	88
10	0,2	1270	51
20	0,1	770	6

Из рис. 4 видно, что у сеянцев, произраставших в сосудах с радиоактивным слоем почвы 10 *см*, верхушечный побег и корень были в 1,5—2 раза короче, чем в контроле, а в варианте с толщиной радиоактивного слоя почвы 20 *см* длина этих органов не отличалась от контрольных сеянцев. Аналогичные изменения отмечены и для сухого веса отдельных органов подопытных растений (рис. 5). Снижение веса сеянцев в варианте с толщиной радиоактивного слоя 10 см вызвано торможением роста главного корня и отсутствием ветвления его в зоне внесения стронция-90.

Изучение распределения стронция-90 в сеянцах сосны показало, что у 3-месячных сеянцев в вариантах опыта с радиоактивным слоем почвы 5 и 10 *см* отдельные органы или не отличаются друг от друга по концентрации изотопа, или имеющиеся между ними различия по этому показателю статистически недостоверны (рис. 6). При равномерном распределении стронция-90 в почве по всему объему сосудов концентрация его в корнях в полтора раза превышала таковую в хвое и стеблях. При этом концентрация стронция-90 в надземных органах у сеянцев в вариантах с радиоактивным слоем 10 и 20 *см* оказалась сходной. Различия между сеянцами этих вариантов по концентрации радионуклида в корнях статистически недостоверны.

Концентрация изотопа в надземных органах и корнях у 14-месячных сеянцев сосны из сосудов с радиоактивным слоем почвы 10 *см* выше, чем в соответствующих органах сеянцев из сосудов с радиоактивным слоем 20 *см* (рис. 7). Парная хвоя у сеянцев обоих вариантов опыта содержала значительно меньше изотопа, чем другие органы. Однако статистически достоверными оказались в этих вариантах опыта только различия в концентрации радионуклида в гипокотилях ($t_{st}=4{,}4>4{,}3$).

Таблица 3

Всхожесть семян и выживаемость сеянцев сосны в зависимости от вертикального распределения стронция-90 в почве (посев — 29 сентября, уборка — через 50 дней после появления всходов)

Толщина радиоактивного слоя почвы, *см*	Доза облучения семян, *рад*	Всхожесть семян, %	Доза облучения верхушечной точки роста сеянцев, *рад*	Количество погибших сеянцев, %
Контроль	0	64	0	0
2	6900	0	—	—
5	2700	18	310	50
10	1380	52	150	20
20	690	54	80	10

Следует отметить, что 3- и 14-месячные сеянцы разных вариантов существенно не отличались друг от друга по концентрации радионуклида в отдельных органах (см. рис. 6 и 7). Однако в растениях старшего возраста суммарно накапливается больше радиоизотопа, чем в молодых сеянцах, что обусловлено большей массой соответствующих растений (рис. 8). В вариантах опыта с радиоактивным слоем почвы 10 и 20 *см* надземные органы и корни трехмесячных сеянцев содержали приблизительно одинаковые количества стронция-90. У 14-месячных сеянцев в варианте с внесением стронция-90 в слой почвы 10 *см* содержание радионуклида в надземных органах было в 2,5 раза выше, чем в корнях. Разница в содержании изотопа в надземных и подземных частях сеянцев в варианте с радиоактивным слоем 20 *см* оказалась статистически недостоверной.

РЕЗУЛЬТАТЫ ОПЫТА С ОСЕННИМ ПОСЕВОМ СЕМЯН

В этом опыте семена, посеянные осенью, взошли через восемь месяцев, в конце мая — начале июня следующего года. Из табл. 3 видно, что до прорастания семена всех опытных вариантов получили значительные дозы облучения. Это оказало влияние на их всхожесть. Так, семена в сосудах с радиоактивным слоем почвы 2 *см* к моменту прорастания контрольных семян получили дозу облучения около 6900 *рад* и полностью потеряли всхожесть. В сосудах с радиоактивным слоем почвы 5 *см* взошло в 3,5 раза меньше семян, чем в контроле. Наименьшее воздействие на всхожесть семян оказало облучение, создаваемое в сосудах с радиоактивным слоем почвы 10 и 20 *см*, то есть в тех вариантах, где концентрация стронция-90 в почве была минимальной.

Ко времени уборки отпад сеянцев в сосудах с толщиной

радиоактивного слоя почвы в 5 *см* составил 50%. Наименьшее число погибших растений наблюдалось в сосудах с равномерным распределением радиоизотопа на всю глубину почвы (20 *см*).

Поскольку дозы облучения, полученные верхушечными точками роста сеянцев за 50 дней вегетации, были сравнительно невелики (80—310 *рад*) и составляли около 12% к дозам, накопленным семенами, то гибель сеянцев, очевидно, была обусловлена нарушениями, вызванными облучением покоящихся и прорастающих семян. Это подтверждается данными, приведенными на рис. 9 и 10. Так, у сеянцев, произраставших в сосудах с радиоактивным слоем почвы в 5 *см*, верхушечный побег не развился. Вследствие отсутствия ювенильной хвои функции ассимилирующих органов выполняли семядоли. У этих сеянцев был резко заторможен и рост корневой системы. Сильное угнетение роста всех органов наблюдалось и у сеянцев, которые находились в сосудах с толщиной радиоактивного слоя почвы в 10 *см*. Сеянцы из сосудов с радиоактивным слоем в 20 *см* (полная глубина сосуда) не отличались по своему росту и развитию от контрольных.

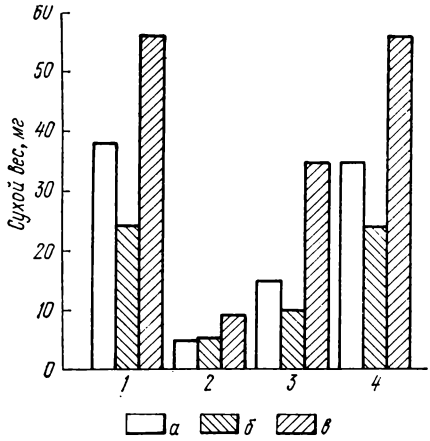


Рис. 10. Средний вес отдельных органов у 50-дневных сеянцев сосны при разном распределении Sr^{90} в почве.

1 — контроль (без внесения Sr^{90} в почву); внесение Sr^{90} в слой почвы толщиной, *см*: *2* — 5, *3* — 10, *4* — 20.
а — корень, *б* — стебель; *в* — хвоя.

На рис. 11 представлены данные по распределению стронция-90 у 50-дневных сеянцев сосны в опыте с осенним посевом семян. Сеянцы, выросшие в сосудах с радиоактивным слоем почвы в 5 *см*, имели более высокие концентрации изотопа во всех органах, чем сеянцы, произраставшие в сосудах с большей толщиной радиоактивного слоя. Так, концентрация стронция-90 в хвое и корнях сеянцев из сосудов с 5-сантиметровым радиоактивным слоем была в среднем в 4 раза выше, чем в соответствующих органах сеянцев двух других вариантов опыта. Несколько меньшие различия между сеянцами этих же вариантов опыта наблюдались по концентрации стронция-90 в гипокотилях. Различия в концентрации радиоизотопа между сеянцами, которые росли на почвах с толщиной радиоактивного слоя в 10 и 20 *см*, невелики и статистически недостоверны.

Как видно из рис. 12, общее содержание стронция-90 в надземных органах 50-дневных сеянцев (во всех вариантах опыта) выше, чем в корнях. Однако эти различия оказались статисти-

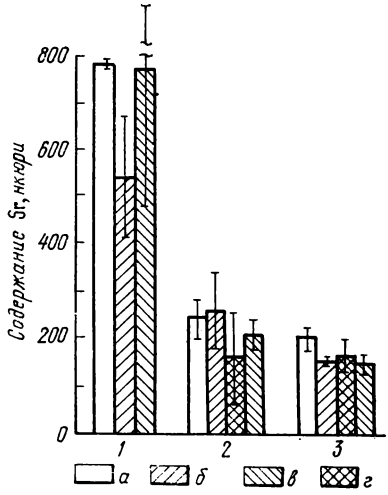


Рис. 11. Накопление Sr^{90} 50-дневными сеянцами сосны при разном распределении радионуклида в почве (*нкюри* на 1 *г* сухого вещества).

Внесение Sr^{90} в слой почвы толщиной, *см*: *1* — 5; *2* — 10 *см*, *3* — 20 *см*.
а — корень, *б* — гипокотиль, *в* — верхушечный побег (без хвои), *г* — хвоя.

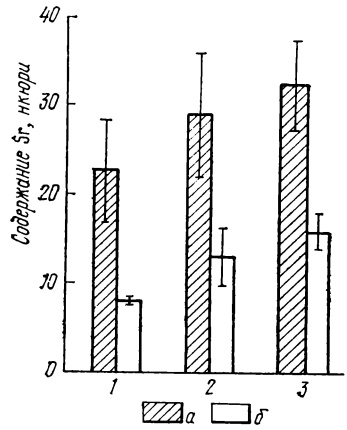


Рис. 12. Содержание Sr^{90} в надземных органах (*а*) и корнях (*б*) 50-дневных сеянцев сосны при разном распределении радиоизотопа в почве (*нкюри* на 1 растение).

Внесение Sr^{90} в слой почвы толщиной, *см*: *1* — 5; *2* — 10; *3* — 20.

чески недостоверными. Несущественными были различия между сеянцами разных вариантов опыта в накоплении радионуклида надземными органами.

Было изучено распределение стронция-90 в корнях 50-дневных и 14-месячных сеянцев, произраставших в сосудах с радиоактивным слоем почвы в 10 *см*. Проведенное с этой целью раздельное определение содержания стронция-90 в участках корней, находившихся в слое внесения радионуклида и вне его, показало, что концентрация радионуклида в частях корня из слоя внесения приблизительно в четыре раза, а содержание изотопа в 6—11 раз больше, чем в частях корней из нижележащего слоя почвы (табл. 4). Это обусловлено, очевидно, преобладанием восходящего тока передвижения веществ, поглощенных из почвы базальными частями корней, над нисходящим.

Итак, изложенные в настоящей работе экспериментальные данные показывают, что всхожесть семян, рост, морфогенез и, в конечном счете, семенное возобновление сосны обыкновенной в значительной степени зависят от вертикального распределения стронция-90 в почве. При одинаковом содержании изотопа в расчете на единицу площади лучевое поражение сосны тем

вероятнее, чем большая часть радионуклида длительное время будет удерживаться в самых поверхностных слоях почвы, где обычно прорастают и развиваются семена растений. В этих условиях очень важно, какую дозу облучения получит зародыш семени или верхушечная меристема растения от момента попадания семян в загрязненную стронцием-90 среду до того времени, когда точка роста стебля удалится от поверхности почвы на достаточно большое расстояние. Можно полагать, что если к этапу интенсивного роста в высоту (Санников, 1961) меристемы побегов у молодых растений сосны не получат повреждающую дозу облучения, то на дальнейший рост таких растений содержащийся в почве стронций-90 не будет оказывать заметного угнетающего действия.

Таблица 4

Распределение стронция-90 в корнях сеянцев сосны разного возраста (при внесении его в поверхностный слой почвы толщиной в 10 *см*), *нкюри*

Части корня	50-дневные сеянцы		14-месячные сеянцы	
	1*	2	1	2
Из слоя почвы с внесением стронция-90 . .	260	9,0	370	51,7
Из слоя почвы без внесения стронция-90	76	1,4	83	4,5

* 1 — на 1 *г* сухого вещества, 2 — на 1 растение.

Как показали специальные расчеты (Карабань, Тихомиров, 1967, 1971), доза облучения молодых сеянцев сосны инкорпорированным радиоизотопом из-за малого его количества в тканях растений слишком незначительна по сравнению с дозой облучения, получаемой от излучателя, находящегося в почве. Поэтому представляется правомерным не учитывать ее при оценке повреждающего действия стронция-90 на ранние стадии развития сосны.

Биологическое действие содержащегося в почве радионуклида сильно зависит от сроков посева семян. Посев в неблагоприятные для прорастания сроки увеличивает время пребывания семян в загрязненной почве, что приводит к соответствующему увеличению дозы облучения. Опасность радиационного поражения сеянцев также будет возрастать, если рост их затормозился под влиянием каких-либо неблагоприятных факторов среды.

Анализ полученного материала подтверждает, что снижение концентрации стронция-90 в верхнем, наиболее загрязненном слое почвы, достигаемое перемешиванием его с нижележащими нерадиоактивными слоями, можно использовать в качестве одного из способов уменьшения повреждающего действия радиоизотопа на семенное возобновление сосны.

Выводы

1. При одинаковом содержании стронция-90 в расчете на единицу площади лучевое поражение семенного возобновления сосны выше в том случае, когда изотоп сконцентрирован в самых верхних слоях почвы.

2. Снижение концентрации радионуклида в верхних слоях почвы путем перемешивания их с нижележащими нерадиоактивными слоями уменьшает повреждающее действие радионуклида на семенное возобновление сосны.

3. Условия среды, задерживающие прорастание семян и тормозящие рост сеянцев в высоту, способствуют увеличению дозы облучения семян и верхушечной меристемы стебля и тем самым повышают опасность радиационного поражения сеянцев сосны на загрязненной стронцием-90 почве.

4. В условиях проведенного опыта накопление и распределение стронция-90 в сеянцах сосны существенно не зависит от вертикального распределения радионуклида в почве.

ЛИТЕРАТУРА

Карабань Р. Т., Тихомиров Ф. А. Влияние радиоактивного загрязнения почвы на сеянцы сосны и ели.— Радиобиология, 1967, т. 7, вып. 2.

Карабань Р. Т., Тихомиров Ф. А. Действие излучений Sr^{90} и Cs^{137} на семена и сеянцы хвойных при радиоактивном загрязнении почвы.— Методы радиоэкологических исследований. М., Атомиздат, 1971.

Миронов Б. А. Методика изучения влияния влажности почвы на миграцию радиоактивных изотопов в искусственных биоценозах.— Методы радиоэкологических исследований. М., Атомиздат, 1971.

Молчанова И. В., Миронов Б. А., Куликов Н. В. Методика экспериментального изучения миграции Sr^{90} в естественных лесных биогеоценозах.— Методы радиоэкологических исследований. М., Атомиздат, 1971.

Санников С. Н. Естественное возобновление сосны и меры содействия ему в Припышминских борах. Свердловск, 1961 (УФАН СССР).

Тихомиров Ф. А. Действие ионизирующих излучений на экологические системы. М., Атомиздат, 1972.

Alexakhin R. M., Karaban R. T., Kulikov N. V., Molchanov A. A., Naryshkin M. A., Tarchevskaya S. V., Tikhomirov F. A., Tyuryukanova E. B., Yushkov P. I. Some aspects of radioactive fission products migration in the forest biogeocenosis and the effects of ionizing radiations on the woody plants.— Sympos. Internat. Radioecologie. Centre d'etudes nucleaires de Cadarache du 8 du 12 September, 1969, vol. 2.

1975 АКАДЕМИЯ НАУК СССР · УРАЛЬСКИЙ НАУЧНЫЙ ЦЕНТР
РАДИОЭКОЛОГИЧЕСКИЕ ИССЛЕДОВАНИЯ ПОЧВ И РАСТЕНИЙ

В. В. СИДОРОВ

ИЗМЕНЕНИЕ РАДИОЧУВСТВИТЕЛЬНОСТИ СЕМЯН СОСНЫ ОБЫКНОВЕННОЙ (Pinus silvestris L.) В ЗАВИСИМОСТИ ОТ ПРОДОЛЖИТЕЛЬНОСТИ ЗАМАЧИВАНИЯ

В результате экспериментальных исследований влияния влажности на радиочувствительность семян было установлено, что семена при замачивании становятся более чувствительными к воздействию облучения (Бреславец, 1946; Трудова, 1950; Энгель, 1950, 1952). Однако зависимость радиобиологического эффекта от содержания воды в объекте оказывается более сложной (Кальдекотт, 1956; Порядкова, 1964; Шишенкова, 1967). Некоторые стороны влияния влажности на радиочувствительность семян изучены недостаточно полно. В настоящей работе приводятся результаты исследования влияния продолжительности замачивания семян сосны на их устойчивость к облучению. Особый интерес представляет изучение влияния гамма-облучения на митотическую активность и частоту возникновения хромосомных аберраций в ранние сроки после облучения, а именно в период первого митотического цикла, который у семян хвойных в указанном отношении недостаточно изучен. Для решения поставленной задачи нами проведен ряд предварительных опытов по определению времени набухания, продолжительности митотического цикла и времени начала первого митоза у семян сосны.

МЕТОДИКА ИССЛЕДОВАНИЙ

Для определения динамики поглощения воды семенами сосны обыкновенной их замачивали двумя способами: в чашках Петри на увлажненном песке и методом полного погружения в стакан с водой. Определение содержания воды проводилось по общеизвестной методике (Ермаков и др., 1952). Навески брали в трех повторностях с интервалом в один час.

Продолжительность митотического цикла определяли колхициновым методом (Паушева, 1970) у проростков из семян необлученных и облученных в дозе 1500 *рад*.

Прежде чем приступить к изложению методики, которой мы воспользовались для определения времени начала первого митоза у корешков проростков сосны, необходимо обсудить вопрос о той временной точке, которую следует считать началом отсчета времени при прорастании. В данном случае мы не можем использовать методики, в которых отсчет времени производится от начала намачивания по той причине, что продолжительность намачивания (в нашем случае отрезок времени от начала замачивания до начала прорастания) варьирует от двух до четырех суток. Поэтому отсчет времени пришлось производить от начала прорастания. Началом прорастания считали появление у проростков геотропического изгиба. Это позволило избежать ошибки, связанной с длительностью набухания. В то же время специальный опыт показал, что все проростки, имеющие геотропический изгиб, сохраняют способность к росту. Необлученные и облученные в дозе 1500 *рад* воздушно-сухие семена замачивали и проращивали в чашках Петри на влажной фильтровальной бумаге при 18° С. После появления у проростков геотропического изгиба (через 68 *ч* у необлученных и через 108 *ч* у облученных в дозе 1500 *рад* семян) их фиксировали через каждые два часа в смеси спирта и уксусной кислоты. Хранение зафиксированного материала производили в 70%-ном спирте. Подсчет митотической активности (в процентах на 1000 клеток) производили на давленых препаратах, окрашенных ацетофуксином. Для определения митотической активности брали по 10 корешков.

Воздушно-сухие (9% воды) и замоченные в течение 24, 48 и 72 *ч* семена сосны обыкновенной облучали в дозах 500, 750, 1000 и 1500 *рад* гамма-лучами кобальта-60 (при мощности дозы 15,5 *рад/мин*) при температуре 1° С в момент облучения. Замачивание и проращивание семян производили в термостате при температуре 18° С. Для анализа митотической активности и частоты хромосомных аберраций брали 70-часовые проростки. Эта временная точка должна соответствовать периоду первого митотического цикла. Корешки фиксировали в смеси спирта и уксусной кислоты в соотношении 3 : 1 в течение 2 *ч* и хранили в 70%-ном спирте. Подсчет митотической активности (в процентах на 1000 клеток) и частоты хромосомных аберраций (в процентах) производили на давленых препаратах, окрашенных ацетофуксином. Для определения митотической активности брали по 10 корешков. С целью анализа частоты хромосомных аберраций на тех же препаратах просматривали по 500 анафаз и телофаз на каждую точку.

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЙ

Анализ поглощения воды семенами показал, что вода интенсивно поглощается ими в первые 8—12 *ч*, причем независимо от того, каким из двух способов семена замачивались. За это

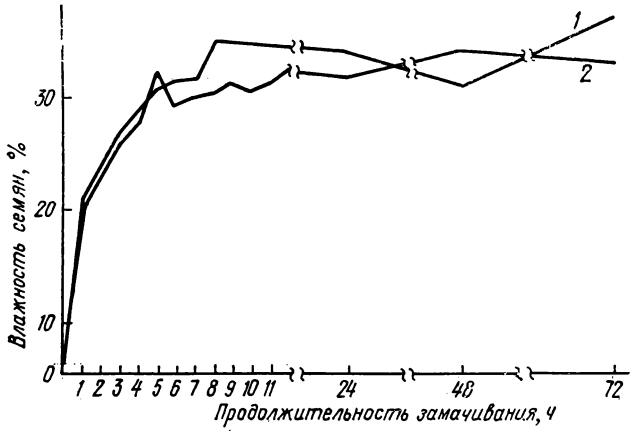


Рис. 1. Динамика поглощения воды семенами сосны в процессе замачивания на песке (*1*) и при полном погружении в воду (*2*).

время содержание воды в семенах повышается до 30—35% от абсолютно сухого веса. В последующий период, вплоть до начала прорастания, содержание воды в семенах практически не изменяется (рис. 1).

Данные о продолжительности митоза и митотического цикла представлены в таблице. Из нее видно, что продолжительность митотического цикла у проростков из необлученных семян равна 33 *ч*; при облучении семян в дозе 1500 *рад* продолжительность митоза практически не изменяется, продолжительность же интерфазы значительно возрастает. В результате этого продолжительность митотического цикла увеличивается на 18 *ч*.

Первый митоз у корешков из необлученных и облученных в дозе 1500 *рад* семян начинается через 36—40 *ч* после начала прорастания, хотя при облучении семян прорастание задерживается примерно на 40 *ч*, по сравнению с необлученным контролем.

Продолжительность митотического цикла у проростков из необлученных и облученных в дозе 1500 *рад* семян сосны обыкновенной

Доза облучения, *рад*	Время митоза, *ч*	Время интерфазы, *ч*	Время митотического цикла, *ч*
Контроль	2,1±0,2	31,0±1,9	33,0±2,0
1500	2,5±0,2	49,0±5,0	51,4±5,3

Из рис. 2 видно, что с увеличением дозы облучения митотическая активность уменьшается как у проростков из семян, облученных через 72 *ч* после начала замачивания, так и у проростков семян,

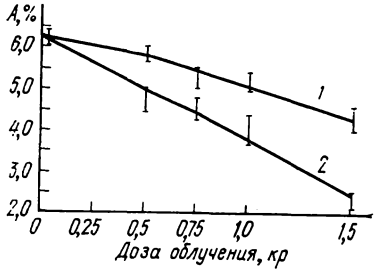


Рис. 2. Зависимость митотической активности (A, %) корешков проростков сосны от дозы облучения.

1 — воздушно-сухие семена; *2* — семена, облученные через 72 *ч* после начала замачивания.

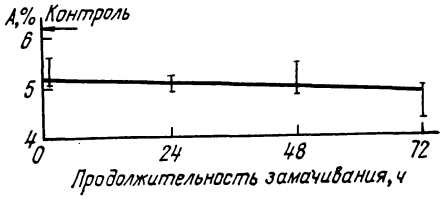


Рис. 3. Зависимость митотической активности (A, %) корешков проростков сосны от времени замачивания при облучении в дозе 750 *рад*.

облученных до замачивания. Облучение семян через трое суток после начала замачивания оказывает более заметное воздействие на митотическую активность, чем облучение их в воздушно-сухом состоянии.

На рис. 3 приведены результаты определения митотической активности у проростков из семян, облученных в дозе 750 *рад*. Облучение семян в дозе 750 *рад* практически не изменяет митотическую активность в процессе замачивания, но снижает ее по сравнению с митотической активностью проростков из необлученных семян.

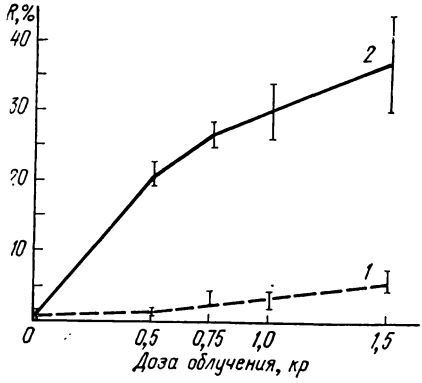


Рис. 4. Зависимость частоты хромосомных аберраций (R — клетки с хромосомными аберрациями) от дозы облучения.

1 — воздушно-сухие семена; *2* — семена, облученные через 72 *ч* после начала замачивания.

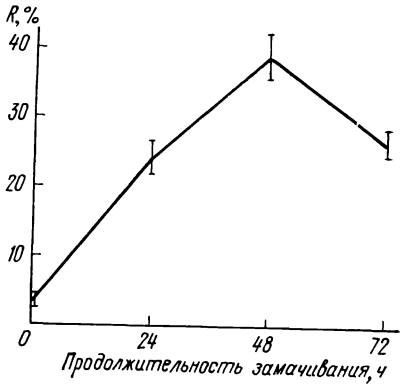


Рис. 5. Зависимость частоты хромосомных аберраций (R — клетки с хромосомными аберрациями) от продолжительности замачивания при облучении в дозе 750 *рад*.

Увеличение дозы при облучении семян в воздушно-сухом состоянии вызывает возрастание числа клеток с хромосомными нарушениями. Такая же закономерность наблюдается при облучении семян через 72 ч после начала замачивания, но радиобиологический эффект в данном случае проявляется сильнее. Так, при облучении семян в дозе 1500 *рад* через трое суток после начала замачивания процент клеток с цитогенетическими нарушениями в 6,2 раза больше, чем при облучении в той же дозе семян в воздушно-сухом состоянии, и почти в 50 раз больше, чем в необлученном контроле (рис. 4).

Для последующих опытов по изучению выхода числа клеток с хромосомными аберрациями при облучении семян в разные сроки начала замачивания нами была выбрана доза 750 *рад*. После такой дозы облучения отмечается значительное число клеток с хромосомными аберрациями при относительно высокой митотической активности, которая почти не изменяется при облучении в разные сроки после начала замачивания. Результаты опытов (рис. 5) показывают, что облучение семян в разные сроки после начала замачивания значительно изменяет число анафаз с хромосомными нарушениями. При облучении семян через 24 и 48 *ч* после начала замачивания процент клеток с цитогенетическими нарушениями резко возрастает, достигая максимального значения при облучении через 48 *ч* после начала замачивания. Если облучить семена через 72 *ч* после начала замачивания, т. е. непосредственно перед началом прорастания, количество анафаз с хромосомными нарушениями несколько снижается.

ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ

В настоящей работе в качестве критериев радиационного поражения были избраны митотическая активность и число клеток с хромосомными аберрациями в анафазе и телофазе меристематических клеток кончиков корней. С увеличением дозы облучения уменьшается митотическая активность и возрастает процент клеток с цитогенетическими нарушениями. Эта закономерность проявляется как у проростков из семян, облученных через 72 *ч* после начала замачивания, так и у проростков из семян, облученных до замачивания. Подобная зависимость выхода числа клеток с хромосомными аберрациями от дозы при облучении воздушно-сухих семян сосны была получена ранее (Лаура, 1966). Мы подтвердили эти результаты на проростках из семян, облученных в воздушно-сухом состоянии, и показали, что такая же закономерность сохраняется и у проростков из семян, облученных через 72 *ч* после начала замачивания, т. е. при облучении семян, находящихся в резко отличном физиологическом состоянии. Облучение семян через трое суток после

начала замачивания оказывает более сильное воздействие на митотическую активность и численность клеток с хромосомными аберрациями, чем из семян, облученных до замачивания (см. рис. 2, 4). Такое явление, по-видимому, объясняется тем, что в процессе набухания семян происходят изменения в обмене веществ, усиливаются дыхание, ферментативная деятельность, начинается деление клеток. Все это ведет к повышению радиочувствительности, которая достигает максимума к периоду усиленной митотической активности (Энгель, 1950, 1952).

Поскольку радиочувствительность семян зависит от продолжительности набухания, нами были проведены опыты по изучению влияния облучения семян в дозе 750 *рад* в разные сроки после начала замачивания на митотическую активность и на количество клеток с цитогенетическими нарушениями (см. рис. 3, 5). Выбранная доза облучения не оказывает существенного влияния на митотическую активность проростков в процессе замачивания по сравнению с проростками из семян, облученных в воздушно-сухом состоянии, но снижает ее по сравнению с митотической активностью у проростков из необлученных семян.

В семенах, облученных через 24 и 48 *ч* после начала замачивания, процент клеток с цитогенетическими нарушениями резко возрастает, достигая максимального значения при облучении через 48 *ч* после начала замачивания. Это происходит, видимо, оттого, что через 48 *ч* после начала замачивания существенно усиливается метаболизм семян. Некоторое уменьшение количества семян с хромосомными аберрациями у проростков из семян, облученных через 72 *ч* после начала замачивания, т. е. непосредственно перед началом прорастания, следует, вероятно, объяснять не уменьшением радиочувствительности, а наличием у меристематических клеток проростков скрытых повреждений, которые впоследствии могут проявиться.

Выводы

1. При гамма-облучении семян сосны обыкновенной в воздушно-сухом состоянии (9% воды) и через 72 *ч* после начала замачивания радиационное поражение усиливается с увеличением дозы облучения. Чем больше доза облучения, тем больше процент клеток с цитогенетическими нарушениями и тем меньше митотическая активность в меристеме корешков проростков на стадии первого митотического цикла.

2. Радиочувствтельность семян зависит от продолжительности замачивания. При изменении продолжительности замачивания изменяется радиочувствительность.

ЛИТЕРАТУРА

Бреславец Л. П. Растения и лучи рентгена. М.— Л., Изд-во АН СССР, 1946.

Ермаков А. И., Арасимович В. В., Смирнова-Иконникова М. И., Мурри И. К. Методы биохимического исследования растений. М.— Л., Сельхозгиз, 1952.

Кальдекотт Р. С. Ионизирующие излучения как орудие в руках селекционера.— Применение радиоактивных изотопов в промышленности, медицине и сельском хозяйстве. М., Изд-во АН СССР, 1956.

Лаура М. П. Влияние условий хранения облученных семян на цитогенетические нарушения в меристемных клетках.— Цитология, 1966, т. 8, вып. 4.

Паушева З. П. Практикум по цитологии растений. М., «Колос», 1970.

Порядкова Н. А. Кривые время — эффект при облучении покоящихся семян разной влажности.— Радиобиология, 1964, т. 4, вып. 1.

Трудова Р. Г. Возрастные изменения чувствительности проростков к лучам рентгена.— Докл. АН СССР, 1950, т. 71, № 6.

Шишенкова Л. К. О характере изменения радиочувствительности в процессе набухания и прорастания семян.— Радиобиология (информационный бюллетень). М., Изд-во АН СССР, 1967, № 10.

Энгель О. С. Влияние яровизации семян озимой пшеницы на чувствительность проростков к воздействию лучей рентгена.— Докл. АН СССР, 1950, т. 71, № 6.

Энгель О. С. Изменение чувствительности семян пшеницы к облучению в зависимости от продолжительности набухания.— Докл. АН СССР, 1952, т. 85, № 1.

1975 | АКАДЕМИЯ НАУК СССР · УРАЛЬСКИЙ НАУЧНЫЙ ЦЕНТР
РАДИОЭКОЛОГИЧЕСКИЕ ИССЛЕДОВАНИЯ ПОЧВ И РАСТЕНИЙ

Л. К. АЛЬШИЦ

О ХАРАКТЕРЕ ИЗМЕНЕНИЯ РАДИОЧУВСТВИТЕЛЬНОСТИ СЕМЯН В ПРОЦЕССЕ ИХ НАБУХАНИЯ И ПРОРАСТАНИЯ

Открытие способности клеток восстанавливаться от лучевых повреждений заставляет по-новому подходить к проблеме радиочувствительности. В настоящее время накоплено большое количество фактов, указывающих на тесную связь радиочувствительности с процессами пострадиационного восстановления. Наиболее подробно это исследовано на бактериях и дрожжах. (Корогодин, 1966). Менее изучен вклад восстановления в общий лучевой эффект клеток с более высокой организацией, в частности клеток растений (Михельсон, 1971).

Одним из известных случаев изменения радиочувствительности являются процессы набухания и прорастания семян, во время которых наблюдаемый эффект (определяемый по выходу хромосомных аберраций) изменяется в 10 и более раз. Причина подобных хорошо известных изменений неясна, так как в течение короткого времени в клетках меняется и физико-химическое состояние, и степень гидратации молекулярных и надмолекулярных структур, а также интенсивность обменных процессов, митотическая активность и целый ряд других физико-химических, биохимических и физиологических показателей. Изменения происходят как в самом субстрате первичных повреждений, так и в системе репарации этих повреждений. Соотношение между поражением и восстановлением приобретает весьма сложный характер. Выяснению этого соотношения и посвящена настоящая работа; другими словами: цель настоящей работы — изучение роли пострадиационного восстановления в наблюдаемых изменениях конечного радиационного эффекта при облучении набухающих и прорастающих семян гамма-лучами радиокобальта.

МЕТОДИКА

Опыты проводились на семенах гороха сорта «Капитал». Исходная влажность семян 9%. Семена облучали в разные

сроки 24-часового намачивания и 30-часового проращивания через каждые 6 *ч* в дозах 800 и 5000 *рад*. Критерием радиочувствительности служили хромосомные аберрации. Выбор двух доз связан с тем, что различия в радиочувствительности семян при облучении их на разных стадиях набухания и прорастания очень велики. Низкие дозы инициируют едва отличимую от спонтанного уровня частоту хромосомных аберраций при облучении семян на разных стадиях набухания и довольно высокую, но вполне доступную для подсчета частоту хромосомных мутаций при облучении прорастающих семян. Высокие дозы дают довольно большой выход аберраций при облучении семян в начале их развития, но делают практически невозможным подсчет хромосомных аберраций из-за большого их числа при облучении проростков. Получены кривые, характеризующие зависимость чувствительности семян от облучения в разные сроки набухания и прорастания для двух доз, причем в дозе 5000 *рад* облучали покоящиеся семена, а также семена на самых ранних стадиях прорастания; в дозе 800 *рад* облучали семена, находящиеся в процессе развития от покоящегося состояния до появления проростков.

Опыты проводили в термостате при температуре 23—24° С. Через 40 *ч* после окончания намачивания, а в некоторых случаях через 33, 36, 39, 42, 45 *ч*, кончики корней фиксировали по методу Карнуа и готовили давленые ацетолакмоидные препараты. Для анализа кривых время — эффект были определены границы первого пострадиационного митоза для всех вариантов опыта. Оказалось, что первое деление заканчивается к 42—45 *ч* после выкладывания семян из чашки Петри. Исходя из этого, первый срок фиксации нами был выбран в начале митотического цикла по достижении постоянной митотической активности в каждом варианте, последний — в конце первого цикла, а три остальных распределялись между ними с интервалом в 3 *ч*.

Во всех вариантах опытов проводили анализ анафаз на наличие и характер наблюдаемых хромосомных аберраций.

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ ЧАСТЬ

Зависимость частоты хромосомных аберраций от облучения в разные сроки набухания и прорастания семян

На рис. 1 представлены кривые стадия — эффект для доз 800 и 5000 *рад*. Видно, что для дозы 800 *рад* на экспериментальной кривой можно выделить три участка. При облучении семян в процессе намачивания эффект почти не изменяется, несмотря на то, что содержание воды в семенах возрастает (рис. 1б). Затем, по истечении 24-часового намачивания и выкладывания семян на влажный песок для прорастания, наблюдается резкое увеличение радиочувствительности. После этого

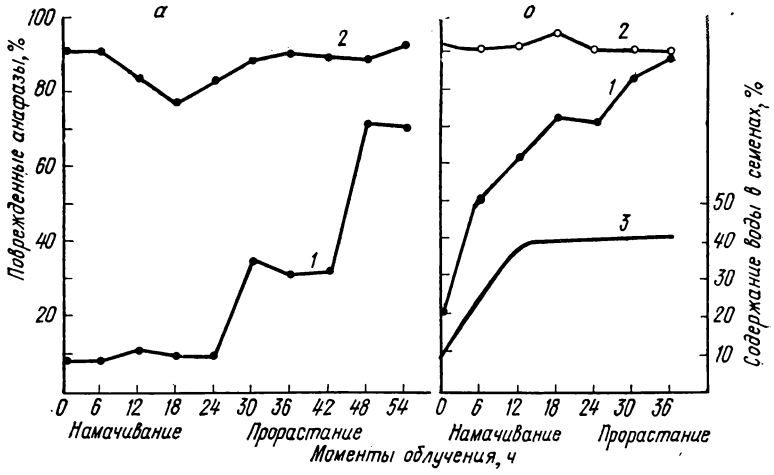


Рис. 1. Частота поврежденных клеток в зависимости от облучения семян в разные моменты набухания и прорастания.

Доза облучения, *рад*: *а* — 800, *б* — 5000.

1 — частота поврежденных анафаз; *2* — процент первично поврежденных клеток (расчетная кривая); *3* — содержание воды в семенах, %.

некоторое время эффект не меняется, и новый пик появляется при облучении семян через 42 *ч* (отсчет времени с момента намачивания). Для дозы 5000 *рад* наблюдается резкое возра-

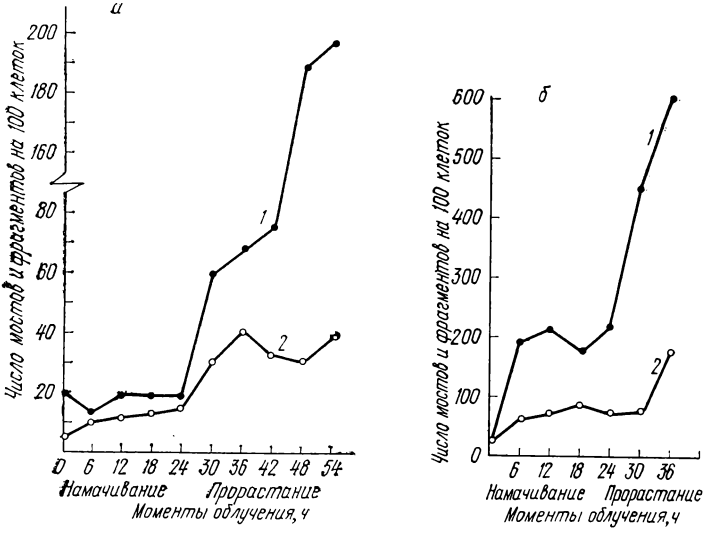


Рис. 2. Число фрагментов (*1*) и мостов (*2*) в зависимости от облучения семян в разные моменты набухания и прорастания.

Доза облучения, *рад*: *а* — 800, *б* — 5000.

стание эффекта. В этих же опытах был проведен дифференцированный учет хромосомных аберраций.

На рис. 2 приведены данные по ацентрическим фрагментам и дицентрикам. Как видно из рисунков, фрагменты полностью повторяют картину, полученную для числа поврежденных клеток, т. е. наблюдается возрастание повреждений этого типа. То же самое можно сказать о мостах, хотя их абсолютное количество возрастает не так резко, как число фрагментов.

Таким образом, облучение семян в разные сроки набухания и прорастания дает картину резкого возрастания эффекта. Сравнение полученных кривых стадия — эффект при облучении семян в дозе 800 *рад* для двух фиксаций (в начале и конце первого пострадиационного митоза) показало, что для ранней фиксации эти кривые лежат на уровне 30—70%, для поздней 8—35%, причем форма этих кривых различна (рис. 3).

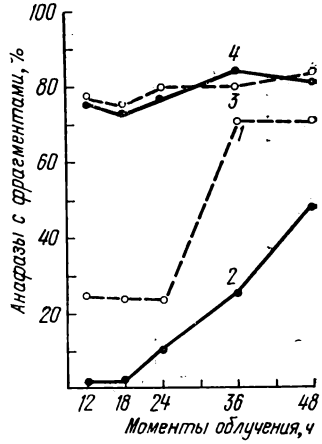


Рис. 3. Частота поврежденных анафаз при облучении семян в разные моменты набухания и прорастания.

Частота, %: *1* — клетки с фрагментами при фиксации корешков в начале первого митоза; *2* — клетки с фрагментами при фиксации корешков в конце первого митоза; *3* — первично поврежденные клетки при фиксации в начале первого митоза, *4* — первично поврежденные клетки при фиксации в конце первого митоза.

Возникает вопрос: каким образом можно объяснить полученные результаты? Сразу же напрашивается вывод о том, что дифференциальную радиочувствительность можно связать с различной первичной поражаемостью клеток, находящихся на разных стадиях клеточного цикла. С другой стороны, нельзя исключить, что различия в реакции клеток на облучение могут зависеть от особенностей клеточного метаболизма, а именно: можно полагать, что эффект на клеточном уровне связан с различными условиями пострадиационного восстановления (Ancel, Vintemberger, 1925; Александров, 1952; Лучник, Царапкин, 1959; Корогодин, 1958).

Для проверки и экспериментального обоснования выводов, вытекающих из наших опытов, оказалось необходимым проанализировать зависимость время — эффект для различных сроков набухания и прорастания семян.

Зависимость время — эффект для семян, облученных в разные сроки набухания и прорастания

Непосредственно наблюдать и учитывать процессы, протекающие в клетках в момент облучения, невозможно. Возникновение повреждений и их проявление всегда разделено интервалом времени, в течение которого происходит целая цепь из-

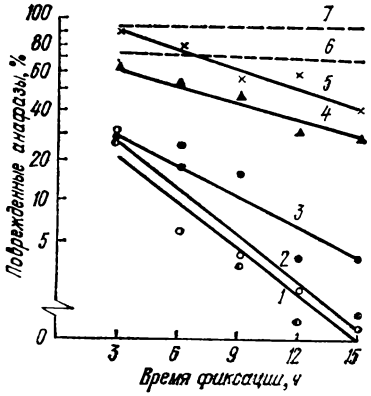


Рис. 4. Частота поврежденных анафаз в зависимости от времени фиксации (доза 800 *рад*).

Процент поврежденных клеток после набухания в течение: *1* — 12 *ч*; *2* — 18 *ч*; *3* — 24 *ч*; *4* — у наклюнувшихся семян; *5* — у проростков; *6*, *7* — процент первично поврежденных клеток: *6* — для набухающих семян; *7* — для наклюнувшихся семян и проростков.

менений, приводящих к наблюдаемому эффекту. Поэтому для количественной оценки степени восстановления и первичной поражаемости клеток приходится пользоваться косвенными методами (Лучник, 1963). В связи с этим представляет большой интерес анализ кривых время — эффект.

На рис. 4 представлены кривые время — эффект для анафаз с фрагментами при облучении в дозе 800 *рад* набухающих семян, наклюнувшихся семян и проростков. Как видно из рисунка, во всех вариантах опыта наблюдается значительное убывание числа поврежденных клеток с увеличением промежутка времени между облучением и фиксацией. Статистический анализ, результаты которого приведены в табл. 1, показывает, что наклон кривых время — эффект достоверно отличается от нуля. Данные по сравнению коэффициентов регрессии (табл. 2) свидетельствуют, что углы наклона кривых время — эффект для набухающих семян достоверно не отличаются друг от друга, т. е. в разные сроки набухания степень уменьшения числа клеток с фрагментами в зависимости от времени фиксации примерно одинакова. Сравнивая коэффициенты регрессии для набухающих и прорастающих семян, можно отметить, что при облучении набухающих семян уменьшение числа клеток, содержащих фрагменты, в зависимости от времени фиксации идет быстрее почти в 1,5—2 раза.

Таблица 1

Зависимость количества поврежденных клеток от времени при облучении семян в разные моменты набухания и прорастания (доза 800 *рад*)

Варианты опыта	Коэффициент регрессии и его ошибка	*t*	*n*	*P*
Семена, набухающие в течение:				
12 *ч*	—0,205±0,038	6,59	23	0,0002
18 *ч*	—0,200±0,034	5,92	23	0,0002
24 *ч*	—0,165±0,042	3,94	23	0,004
Наклюнувшиеся семена	—0,102±0,022	4,65	18	0,0002
Проростки	—0,086±0,024	3,50	14	0,005

Таким образом, кривые время — эффект для набухающих и прорастающих семян имеют различные углы наклона относительно оси абсцисс, что свидетельствует о неодинаковом характере изменения числа поврежденных клеток при облучении семян в разное время набухания и прорастания.

При облучении набухающих семян в дозе 5000 *рад* наблюдается аналогичная картина: чем позднее после облучения начинается деление клеток, тем меньше доля поврежденных клеток (рис. 5).

Таблица 2

Сравнение коэффициентов регрессии для кривых время—эффект при облучении семян в разные периоды набухания и прорастания

Сравниваемые варианты опыта	*t*	*P*
12 и 18	0,386	0,72
12 и 24	1,06	0,29
12 и 36	2,50	0,01
12 и 48	2,80	0,01
18 и 24	1,19	0,03
18 и 36	1,35	0,05
18 и 48	2,68	0,01
24 и 36	0,50	0,64
24 и 48	0,44	0,60
36 и 48	0,76	0,51

Примечание. 12, 18 и 24 — семена, набухающие в воде соответственно 12, 18 и 24 *ч*; 36 — наклюнувшиеся семена; 48 — проростки.

Кривые время — эффект имеют несколько возможных объяснений. Как уже отмечалось, фиксация корешков во всех вариантах опыта проводилась в пределах первого после облучения митоза. Поэтому объяснение уменьшения числа поврежденных клеток с точки зрения элиминации повреждений в последующих делениях исключается самой постановкой опыта. В связи с тем, что кривые время — эффект служат отражением распределения клеток по разным стадиям их жизненного цикла, на первый взгляд кажется, что наблюдаемая картина связана с дифференциальной радиочувствительностью стадий. Однако вышеописанные экспериментальные данные трудно объяснить с этой точки зрения, так как наклоны кривых время — эффект относительно оси абсцисс при облучении набухающих и прорастающих семян различны. Легче всего предположить, что наблюдаемое явление связано с восстановлением клеток в пострадиационный период. Клетки, вступающие в митоз позднее, располагают большим временем для осуществ-

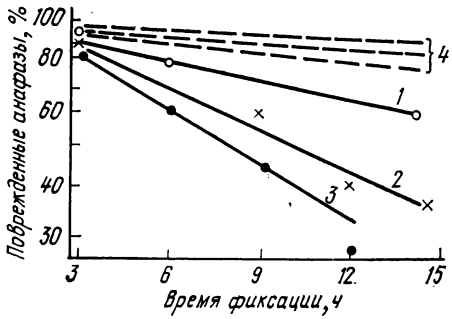


Рис. 5. Частота поврежденных анафаз в зависимости от времени фиксации (доза 5000 *рад*).

Процент поврежденных клеток после набухания в течение: *1* — 24 *ч*; *2* — 18 *ч*; *3* — 12 ч; *4* — процент первично поврежденных клеток для набухающих семян.

ления этого процесса. Используя косвенный метод, предложенный Н .В. Лучником (1963), можно количественно оценить первичную поражаемость. Как видно из рис. 1, число первично поврежденных клеток не изменяется во времени. Для всех вариантов опыта эти кривые идут горизонтально. Следует отметить, что для набухающих семян кривые процента поврежденных клеток совпадают, поэтому результаты суммированы и на рис. 5 представлены одной кривой.

Результаты статистического анализа подтверждают сделанный вывод ($t=0{,}1$, $n=23$, $P=0{,}94$). Для проростков и наклюнувшихся семян наблюдается такая же картина. Кривые практически выходят из одной точки и располагаются настолько близко друг к другу, что достоверной разницы между соответствующими точками нет. Однако для набухающих семян линия регрессии располагается на уровне 70%, для наклюнувшихся семян и проростков линии регрессии лежат на уровне 90%.

Заключение

Анализируя причины изменения радиочувствительности семян в процессе их набухания и прорастания, необходимо отметить, что понятие радиочувствительности является весьма комплексным. В. Я. Александров, определяя понятие «чувствительность», сформулировал следующее положение: «Результаты пагубного воздействия различных агентов на живые клетки и организмы зависят от трех факторов: от первичной поражаемости объекта, от трансформации этого первичного повреждения в нарушение биологических функций и от репараторной способности объекта» (Александров, 1952, стр. 89).

Таким образом, следует ожидать, что первичная поражаемость, а также восстановительные процессы в пострадиационный период должны оказывать решающее влияние на количественную выраженность конечного радиационного эффекта. К этому же выводу приводит анализ экспериментальных фактов.

Во-первых, различный наклон линий регрессии относительно оси абсцисс при анализе зависимости время — эффект может свидетельствовать о протекании процессов восстановления в пострадиационный период.

Другая группа фактов, подтверждающих сделанный вывод, получена при сравнении кривых стадия — эффект для ранней (в начале митоза) и поздней (в конце митоза) фиксаций. Если изменение радиочувствительности связано с изменением только первичной поражаемости клеток при облучении их в разные моменты развития зародыша, то следует ожидать, что кривые будут параллельны и будут иметь одинаковую форму. В опыте наблюдается иная картина (рис. 3): кривые стадия — эффект для разных фиксаций имеют различную форму. Этот экспери-

ментальный факт может быть объяснен наличием пострадиационного восстановления.

И, наконец, третья группа фактов получена при определении числа первично поврежденных клеток. Расчет показал, что в ходе развития, за исключением некоторых стадий набухания, процент первично поврежденных клеток практически не изменяется (рис. 1 *а*, *б*). Это подтверждается данными, вытекающими из анализа зависимости время — эффект; из них следует, что кривые первичной поражаемости не зависят от времени фиксации, но для набухающих семян лежат ниже, чем кривые первичной поражаемости для наклюнувшихся семян и проростков (рис. 4).

Выводы

1. Установлено, что при облучении развивающихся семян от покоящегося семени до проростков лучевой эффект увеличивается в 7—10 раз.

2. Анализ экспериментальных данных показал, что столь резкое изменение радиочувствительности связано с вариацией как первичной поражаемости клеток, так и восстановления клеток от первичных цитогенетических повреждений в пострадиационный период, причем процессам восстановления принадлежит главная роль.

ЛИТЕРАТУРА

Александров В. Я. Экспериментальный анализ понятия «чувствительность».— Изв. АН СССР, серия биол., 1952, т. 4, № 1.

Корогодин В. И. Некоторые закономерности пострадиационных изменений.— Биофизика, 1958, т. 3, № 7.

Корогодин В. И. Проблемы пострадиационного восстановления. М., Атомиздат, 1966.

Лучник Н. В. Об одном из возможных применений теории вероятности в радиационной цитогенетике.— Применение математических методов в биологии, т. 2. Л., Изд-во ЛГУ, 1963.

Лучник Н. В., Царапкин Л. С. Об обратимости цитогенетических лучевых повреждений.— Докл. АН СССР, 1959, т. 124, № 1.

Михельсон В. М. Ограниченная роль репарации ДНК в восстановлении хромосом, поврежденных ионизирующей радиацией.— Цитология, 1971, т. 12, № 8.

Ancel P., Vintemberger P. Sur la radiosinsibilite cellulaire.— Comp., Rend. Soc. Biol., 1925, vol. 92, N 5.

1975 АКАДЕМИЯ НАУК СССР · УРАЛЬСКИЙ НАУЧНЫЙ ЦЕНТР
РАДИОЭКОЛОГИЧЕСКИЕ ИССЛЕДОВАНИЯ ПОЧВ И РАСТЕНИЙ

В. В. СИДОРОВ

ВЛИЯНИЕ ГАММА-ИЗЛУЧЕНИЯ КОБАЛЬТА-60 НА МИТОТИЧЕСКУЮ АКТИВНОСТЬ И РАЗМЕРЫ КЛЕТОК В ПРОРОСТКАХ СОСНЫ ОБЫКНОВЕННОЙ (Pinus silvestris L.)

Несмотря на то, что в настоящее время имеется обширная литература, посвященная действию ионизирующих излучений на растения, вопрос о влиянии излучений на процесс деления клеток изучен далеко не достаточно. Задачей настоящей работы является исследование действия различных доз гамма-облучения на рост и деление клеток.

Контрольные и облученные в воздушно-сухом состоянии гамма-лучами кобальта-60 семена сосны обыкновенной проращивали в термостате при температуре 24° С в темноте. Дозы облучения: 75, 250, 500, 1000, 2000, 2500 *рад* при мощности источника 1428 *рад/ч*. Для анализа митотической активности и размеров клеток брали 72-часовые проростки. Началом прорастания семян считали появление у корешков проростков геотропического изгиба. Проростки фиксировали смесью Карнуа в модификации Навашина в течение 24 *ч* и хранили в 70%-ном спирте, после этого их окрашивали ацетолакмоидом по обычной методике. Приготовляли давленые препараты, с которых при помощи рисовального аппарата срисовывали модели делящихся клеток (на стадиях ана- и телофаз), окруженных многослойными участками ткани. В этом случае исключалось измерение клеток в тангенциальном направлении (полюса ана- и телофаз находились в одной плоскости) и монослой клеток, окруженный многослойными участками ткани, не подвергался заметному сплющиванию. Площади клеток определяли сопоставлением взвешенных моделей клеток с весом эталона площади. Параллельно измеряли длину 144-часовых проростков в разных вариантах опыта.

Определение митотической активности меристематических клеток корня показало, что наибольшая митотическая актив-

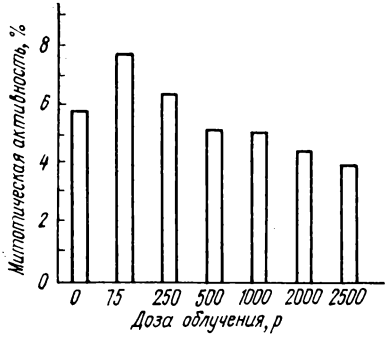


Рис. 1. Митотическая активность в корешках проростков сосны и зависимости от дозы гамма-облучения.

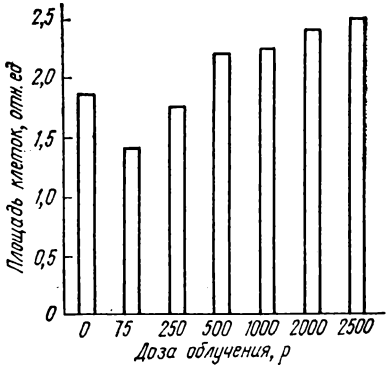


Рис. 2. Размеры клеток в корешках проростков сосны в зависимости от дозы гамма-облучения.

ность наблюдается при облучении семян в дозе 75 *рад*. Облучение в дозах от 250 до 1000 *рад* не влияло на митотическую активность корешков, а в дозах 2000—2500 *рад* заметно снижало ее (рис. 1).

Поскольку в ряде работ (Тимофеев-Ресовский и др., 1957; Лучник, 1958) предполагается, что стимулирующий и подавляющий эффекты ионизирующей радиации и вызываемое ими увеличение и уменьшение митотической активности приводит к изменению линейных размеров клеток, проведены измерения площадей клеток у облученных и необлученных растений. Во всех случаях клетки растений, облученных в стимулирующей дозе 75 *рад*, были меньшего размера, чем у растений из необлученных семян. Площадь клеток у корешков растений от семян, облученных в диапазоне доз 500—2500 *рад*, оказалась значительно больше, чем в необлученном контроле. Так, у растений, облученных в дозе 2500 *рад*, угнетающей деление клеток, площадь клеток была на 25% больше, чем у необлученных (рис. 2).

Результаты цитологического анализа находятся в хорошем соответствии с результатами наблюдений по действию гамма-облучения на рост проростков (см. таблицу). Длина проростков семян, облученных в дозе 75 *рад*, оказалась на 32,5% больше, чем в необлученном варианте. Дальнейшее увеличение дозы облучения вызывало подавление роста, и в конечном счете проростки у семян, облученных в дозе 2500 *рад*, оказались на 83% короче, чем у необлученных.

Анализ полученных результатов подтверждает, что имеется определенная взаимосвязь между проявлением стимулирующего и подавляющего действия ионизирующей радиации, с

Влияние различных доз гамма-облучения на длину корешков проростков сосны

Доза облучения, *рад*	Длина корешков	
	мм	% к контролю
0	32,82±1,63	100
75	43,50±1,93	133
250	34,75±1,84	106
500	26,02±1,38	79
1000	23,77±1,91	72
2000	15,70±1,32	48
2500	5,55±0,61	17

одной стороны, и изменением митотической активности, а также изменением размеров клеток, с другой. По всей вероятности, стимулирующее действие гамма-облучения связано с ускорением, а угнетающее действие — с замедлением митоза. Стимуляция пролиферативной активности ткани приводит к «измельчению» клеток, которое в меристематической популяции является, по-видимому, процессом обратимым, и клетки при прохождении дальнейших фаз растяжения и дифференциации достигают размеров, присущих клеткам необлученных тканей, обеспечивая тем самым прирост, происходящий в процессе радиостимуляции. Проявления стимулирующего действия гамма-облучения на клеточном и органно-тканевом уровнях, вероятно, не совпадают по времени; проявление радиостимуляции на клеточном уровне предшествует таковому на органно-тканевом. В связи с этим некоторые авторы, в частности Л. П. Бреславец (1946), не обнаруживают уменьшения размеров клеток.

У радиационно угнетенных растений наблюдается диаметрально противоположная картина: митотическая активность значительно снижается, размеры клеток заметно увеличиваются, а длина проростков уменьшается.

Таким образом, гамма-облучение семян сосны обыкновенной в зависимости от дозы облучения оказывает двоякое действие на рост проростков, пролиферативную способность и размеры клеток в меристематической ткани: облучение семян в дозе 75 *рад* вызывает увеличение митотической активности корешков проростков сосны, временное уменьшение размеров меристематических клеток и, в конечном счете, приводит к увеличению длины проростков; увеличение дозы облучения до 2000—2500 *рад* значительно снижает митотическую активность, размеры клеток при этом увеличиваются, а длина проростков существенно уменьшается.

ЛИТЕРАТУРА

Бреславец Л. П. Растения и лучи Рентгена. М.—Л., Изд-во АН СССР, 1946.

Лучник Н. В. Влияние слабых доз излучателей на митоз у гороха.— Бюлл. Уральского отделения МОИП (Свердловск), 1958, вып. 1.

Тимофеев-Ресовский Н. В., Порядкова Н. А., Макаров Н. М., Преображенская Е. И. К проблеме радиостимуляции растений. I. О действии слабых доз ионизирующих излучений на рост и развитие растений.— Сборник работ лаборатории биофизики, ч. 1. Труды Ин-та биологии УФАН СССР, 1975, вып. 9.

1975 АКАДЕМИЯ НАУК СССР · УРАЛЬСКИЙ НАУЧНЫЙ ЦЕНТР
РАДИОЭКОЛОГИЧЕСКИЕ ИССЛЕДОВАНИЯ ПОЧВ И РАСТЕНИЙ

А. А. ПОЗОЛОТИН, Л. К. АЛЬШИЦ

ИЗМЕНЕНИЕ РАДИОЧУВСТВИТЕЛЬНОСТИ СЕМЯН ГОРОХА ПОД ВЛИЯНИЕМ МАЛЫХ ДОЗ ГАММА-ОБЛУЧЕНИЯ

В настоящее время известно, что предварительное облучение в малых дозах увеличивает радиорезистентность организмов к последующим облучениям в сублетальных дозах. Это установлено на микроорганизмах (Кашкин, 1958), парамециях (Лозина-Лозинский, Александров, 1959), мышах, крысах, собаках и на растениях (Лучник, Куликова, 1959; Taenzer, Krakowski, 1966; Davies, Wall, 1960; Schoen, Maqnus, 1953).

Анализ литературных данных показывает, что проявление эффекта радиационно-индуцированной радиорезистентности (ЭРИР) может зависеть от соотношения величины доз предварительного и повторного облучений, от промежутка времени между первым и вторым облучениями, а также от таких факторов, как содержание кислорода, температура среды, влажность и др.

В большинстве случаев ЭРИР отмечали в экспериментах на целостном организме (Арбузов, Ломонос, 1962), на клеточном же и субклеточном уровнях проявление этого эффекта изучено недостаточно.

В настоящей работе на клетках зародышевой меристемы гороха, используя в качестве критерия радиобиологических реакций цитогенетические показатели, изучали: а) зависимость проявления ЭРИР от дозы первого облучения при фиксированном повторном облучении и б) зависимость ЭРИР от дозы повторного облучения при фиксированной дозе предварительного облучения.

МАТЕРИАЛ И МЕТОДИКА

Опыты проводились на семенах гороха сортов «Капитал» урожая 1964 г. и «Красноуфимский-70» урожая 1969 г. при влажности покоящихся семян 12%. Источником гамма-лучей служил препарат кобальта-60 стационарной установки мощностью 22 *рад/мин*.

Таблица 1

Зависимость частоты клеток с хромосомными аберрациями от дозы предварительного гамма-облучения

Доза предварительного облучения, *рад*	Доза повторного облучения, *рад*	Поврежденные клетки, абсолютное число	Поврежденные анафазы, %
0	0	7	2,8±0,95
0	2500	69	34,5±7,3
50	2500	33	16,5±4,2
100	2500	35	14,0±3,4
250	2500	64	25,6±4,7
500	2500	77	38,5±4,3
1000	2500	108	54,0±8,1

В первой серии опытов покоящиеся семена гороха сорта «Капитал» предварительно облучали гамма-лучами в дозах 50, 100, 250, 500 и 1000 *рад*. Повторному облучению семена подвергались в набухшем состоянии после 24-часового намачивания при температуре 23—24° С в дозе 2500 *рад*, одинаковой для всех вариантов опыта.

Во второй серии опытов покоящиеся семена гороха сорта «Красноуфимский-70» облучали предварительно в дозе 100 *рад*, при повторном облучении — в дозах 500, 1000, 1500, 2000, 2500, 3000, 3500, 5000 *рад* после 24-часового намачивания. Временной промежуток между первым и вторым облучениями в обоих случаях 14 суток. Контролем служили, с одной стороны, семена, вообще не подвергавшиеся облучению, а с другой — семена, облученные в набухшем состоянии, но не подвергавшиеся предварительному облучению. В качестве критерия радиочувствительности мы использовали частоту клеток с хромосомными аберрациями и митотическую активность. Корешки

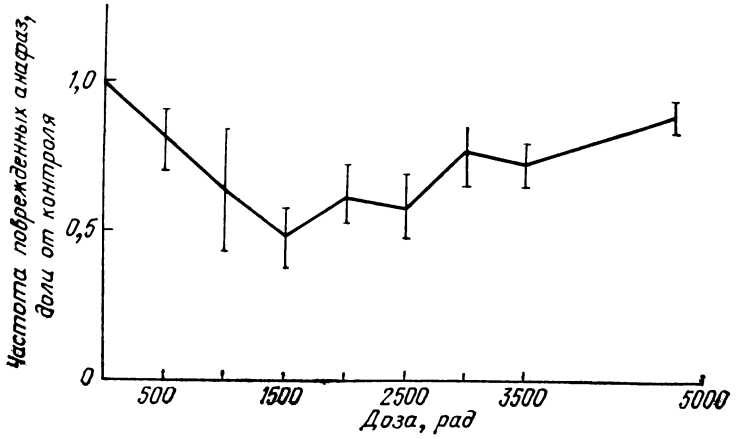


Рис. 1. Зависимость эффекта предварительного облучения от дозы повторного облучения (доза предварительного облучения 100 *рад*).

гороха фиксировали в смеси этилового спирта с ледяной уксусной кислотой при соотношении 3 : 1 в конце первого пострадиационного митоза через 40 *ч* после конца намачивания.

Цитологический анализ проводили на временных давленых препаратах. Учитывали хромосомные аберрации типа «мостик» и «фрагмент» в анафазе корневой меристемы. Поврежденной считалась клетка, в которой имелось хотя бы одно из указанных повреждений. В каждом корешке исследовали по 50 анафаз. Всего на каждую точку опыта анализировали по 200—250 анафаз. Параллельно с анализом хромосомных аберраций учитывали митотическую активность. Для этого просчитывали по 1000 клеток первичной корешковой меристемы и из них определяли процент делящихся клеток. Анализ препаратов проводили при увеличении 900 с масляной иммерсией.

Полученные цифровые данные подвергали статистической обработке. Вычисляли значение средней и ошибку к ней, проводили попарное сравнение отдельных значений средних по вариантам, используя критерий Стьюдента (Плохинский, 1961). За уровень значимости принимали $P=0{,}05$. Некоторые данные были обработаны по методу дисперсного анализа.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Результаты первой серии опытов (табл. 1) показывают, что уровень поврежденных клеток в необлученном варианте составляет около 3%, тогда как в вариантах с облучением 54%. Наибольший интерес представляет сравнение двух вариантов: контрольного, в котором семена подвергались облучению в набухшем состоянии, но без предварительного облучения в покоящемся состоянии, и варианта с предварительным облучением, в котором покоящиеся семена были облучены в дозах 50 и 100 *рад*, а в набухшем состоянии еще и в дозе 2500 *рад*. Можно заметить, что предварительное облучение покоящихся семян в дозах 50 и 100 *рад* более чем вдвое снижает частоту поврежденных клеток, а в дозах 500 и 1000 *рад* усиливает лучевое поражение.

Данные второй серии опытов указывают на явную тенденцию возрастания числа поврежденных клеток при увеличении дозы повторного облучения. Это видно из рис. 1, где по оси ординат отложено отношение частоты анафаз с хромосомными аберрациями в варианте с предварительным облучением к частоте анафаз с хромосомными аберрациями в варианте без предварительного облучения. Другими словами, за единицу принята частота клеток с хромосомными перестройками, вызванная под влиянием отдельной дозы второго облучения без предварительного лучевого воздействия. Кривая имеет выраженный провал в диапазоне доз повторного облучения от 1000 до 2500 *рад*, т. е. частота возникновения поврежденных клеток в указанном интервале доз уменьшается, а затем постепенно

Таблица 2

Зависимость величины дозы, вызывающей 50% клеток с хромосомными аберрациями, от дозы предварительного облучения

Доза предварительного облучения, *рад*	Доза повторного облучения, *рад*
0	1000
50	3000
100	2500

приближается к единице. Дисперсионный анализ подтверждает наличие такой закономерности ($P=0{,}001$). Если проследить, как изменяется доза повторного облучения, вызывающая 50% клеток с хромосомными аберрациями к концу первого пострадиационного митоза, то из табл. 2 видно, что при предварительном облучении покоящихся семян эта доза возрастает в 2,5—3 раза. Следовательно, эффект радиоционно-индуцированной радиарезистентности зависит от соотношения величин доз первого и второго облучения.

Все вышесказанное касалось общего показателя лучевого поражения — частоты поврежденных клеток. На рис. 2 приведены результаты по отдельным видам повреждений: зависимость числа мостов (рис. 2, *а*) и числа фрагментов (рис. 2, *б*) от дозы облучения. Как видно из рисунков, частота мостов всегда меньше, чем частота фрагментов. Различия эти сущест-

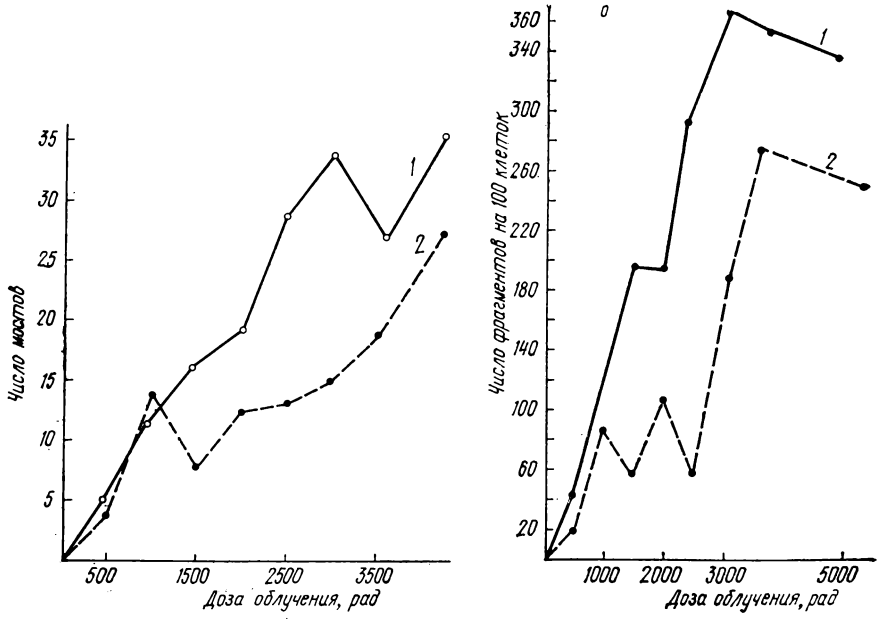


Рис. 2. Зависимость от дозы повторного облучения:
а — числа мостов; *б* — числа фрагментов.

венны и подтверждаются статистическим анализом ($t=3{,}98$, $P=0{,}005$).

Анализируя данные, приведенные на рис. 2, *а*, следует отметить, что при предварительном облучении покоящихся семян в дозе 100 *рад* частота мостов снижается по сравнению с вариантом, в котором семена не были предварительно облучены. Уменьшение числа мостов наблюдается в интервале доз от 1500 до 5000 *рад* при повторном облучении. Количество фрагментов с увеличением дозы повторного облучения резко возрастает (рис. 2, *б*). При этом в случае предварительного облучения в дозе 100 *рад* кривая доза — эффект идет на значительно более низком уровне по сравнению с вариантом без предварительного облучения. Обращает на себя внимание тот факт, что с увеличением дозы облучения степень повреждения клеток остается неизменной.

Таблица 3

Среднее число фрагментов на клетку

Доза повторного облучения, *рад*	Доза предварительного облучения, *рад*	Среднее число фрагментов на клетку
1000	0	2,5 ±0,6
	50	2,81±0,6
	100	2,93±0,15
1500	0	3,0 ±0,41
	50	2,08±0,23
	100	2,63±0,93
2000	0	3,10±0,19
	50	2,76±0,71
	100	2,88±0,54
2500	0	3,30±0,56
	50	2,68±0,42
	100	3,47±1,17
3000	0	3,65±0,54
	50	3,29±1,87
	100	3,40±0,63
3500	0	4,09±1,48
	50	3,30±0,79
	100	2,59±0,79

Эффект изменяется лишь за счет числа поврежденных клеток. Это подтверждается данными табл. 3, где приведено среднее число фрагментов на клетку. Попарное сравнение средних величин как внутри вариантов, так и между ними показывает, что статистически достоверной разницы между сравниваемыми величинами нет ($P=0{,}05$).

Исключение составляют некоторые варианты, в которых учет фрагментов был затруднителен из-за большой фрагментации хромосом.

Наряду с учетом и анализом возникновения хромосомных аберраций в зависимости от дозы облучения исследовалось также изменение митотической активности (рис. 3). В необлученном контроле первые делящиеся клетки появляются через 25—26 *ч*, а через 28 *ч* митотическая активность составляет в среднем 5%.

В облученных вариантах первые делящиеся клетки появляются по истечении 32—36 *ч*. В это время делятся единичные

Рис. 3. Зависимость митотической активности от дозы предварительного и повторного облучения.

1 — кривая митотической активности для необлученного контроля; *2* — кривая митотической активности для семян без предварительного облучения 2500 *рад*; *3* — кривая митотической активности для семян, облученных предварительно в дозе 100 *рад* и повторно в дозе 2500 *рад*.

клетки и учет митотической активности затруднителен. Спустя 36—37 *ч* митотическая активность во всех облученных вариантах достигает 3—5%.

Следовательно, появление первых делящихся клеток в необлученном и облученных вариантах разделено довольно большим интервалом времени (приблизительно 7—8 *ч*). Интересно, что во всех облученных вариантах первые делящиеся клетки появляются в одно и то же время, т. е. такой фактор, как добавка в виде предварительного облучения в малых дозах, не вызывает заметного сдвига ни во времени появления первых делящихся клеток, ни в абсолютных величинах митотической активности.

Заключение

Подводя итог всему сказанному, необходимо еще раз подчеркнуть, что возмущение, сообщаемое покоящимся семенам в виде малых доз предварительного облучения, существенно изменяет их радиочувствительность к последующему облучению в массированных дозах. Некоторые авторы считают, что наблюдаемый эффект связан со сдвигом фаз митотического цикла. В результате этого второе облучение в большой дозе приходится, по их мнению, не на одну и ту же стадию по сравнению с вариантом без предварительного облучения, а на другую, предположительно менее радиочувствительную (Kallman, 1963). Если бы это действительно было так, ожидался бы сдвиг во времени вступления клеток в митоз у варианта с предварительным облучением. Однако, как показано на рис. 3, такого сдвига не происходит. Кроме того, трудно предположить, что столь малые дозы, как 50 и 100 *рад*, при облучении покоящихся семян с их крайне замедленным течением метаболических процессов могли изменить прохождение фаз митотического цикла.

Мы полагаем, что эффект радиационно-индуцированной радиорезистентности связан с изменениями во внутриклеточных системах, ответственных за репарацию поражений, в резуль-

тате чего в случае предварительного облучения семян в малых дозах стимулируются процессы восстановления первичных цитогенетических повреждений.

Выводы

1. Установлено, что предварительное облучение покоящихся семян в малых дозах увеличивает их радиорезистентность к последующему облучению в массированной дозе.

2. Описанный эффект проявляется при дозах предварительного облучения 50 и 100 *рад* и не возникает при дозах 500 и 1000 *рад*.

3. При дозе предварительного облучения 100 *рад* описанный феномен наблюдается только для достаточно больших доз повторного облучения (в условиях описываемых опытов начиная с дозы 500 *рад*).

ЛИТЕРАТУРА

Арбузов С. Я., Ломонос П. И. О приобретенной радиорезистентности.— Радиобиология, 1962, т. 2, № 4.

Кашкин К. П. О возможности адаптации *Bacterium faecalis algaligenes* к воздействию ионизирующего излучения.— Вопросы радиобиологии. М., Атомиздат, 1958.

Лозина-Лозинский Л. К., Александров С. Н. О резистентности парамеций из радиоактивных источников.— Цитология, 1959, т. 1, вып. 1.

Лучник Н. В., Куликова В. Г. Влияние предварительного облучения мышей на их последующую радиорезистентность.— Докл. АН СССР, 1959, т. 110, № 6.

Плохинский Н. А. Биометрия. Новосибирск, Изд-во Сиб. отд. АН СССР, 1961.

Davies D. R., Wall E. T. Reduction below the additive base line by bractinated doses of gamma radiation.— Genetics, 1960, vol. 46, N 7.

Kallman R. Recovery from radiation injury a proposed mechanism.— Nature, 1963, vol. 197, N 4867.

Taenzer V., Krakowski E. Änderung der Radiosensibelität durch Verbestrahlung.— Strahlentherapie, 1966, Bd. 729, N 1.

Schoen H., Magnus H. Führen Schwachbestrahlungen zu einer Resistenzsteigerung und wie sind sie zu Erklärung.— Strahlentherapie, 1953, Bd. 90, N 5.

1975 АКАДЕМИЯ НАУК СССР · УРАЛЬСКИЙ НАУЧНЫЙ ЦЕНТР
РАДИОЭКОЛОГИЧЕСКИЕ ИССЛЕДОВАНИЯ ПОЧВ И РАСТЕНИЙ

Л. К. АЛЬШИЦ, Н. Г. БЕРНЕР, А. А. ПОЗОЛОТИН

О ВОЗМОЖНОСТИ СТИМУЛЯЦИИ СИСТЕМЫ ВОССТАНОВЛЕНИЯ МАЛЫМИ ДОЗАМИ ИОНИЗИРУЮЩЕГО ИЗЛУЧЕНИЯ

Ранее было показано, что облучение покоящихся семян гороха в малых дозах гамма-лучами снижает радиочувствительность этих же семян к облучению в массированных дозах (Куликов и др., 1971). Увеличение радиорезистентности предварительным облучением объяснялось стимуляцией (активацией) процессов восстановления клеток от первичных цитогенетических повреждений (см. статью А. А. Позолотина, Л. К. Альшиц в настоящем сборнике). Для проверки высказанного предположения нами проанализировано действие предварительного облучения в малых дозах на зависимость частоты клеток с хромосомными аберрациями от времени фиксации после облучения.

МАТЕРИАЛ И МЕТОДИКА

Опыты проводились на семенах гороха сорта «Красноуфимский-70». Для облучения использовали стационарный источник гамма-лучей кобальта-60 при мощности дозы 18 *рад/мин*. Покоящиеся семена с исходной влажностью 10% облучали предварительно в дозе 50 и 100 *рад*. Через 14 суток после предварительного облучения эти семена замачивали в дистиллированной воде при температуре 22—23° С, а через 24 *ч* после замачивания облучали повторно в дозе 1500 *рад*. Контролем к опыту служили семена вообще не облученные, а также семена, облученные в набухшем состоянии в дозе 1500 *рад*, но не подвергавшиеся предварительному облучению. Для выбора времени фиксации в этих опытах проводили определение продолжительности митотического цикла. С этой целью семена гороха обрабатывали раствором колхицина. Через 20 *ч* после намачивания в воде семена помещали в 0,02%-ный раствор

колхицина на 3,5 *ч*, а затем в течение 0,5 *ч* семена промывали в дистиллированной воде. Через 24 *ч* после намачивания семена облучали в дозе 1500 *рад*. Корешки фиксировали через 23, 25, 27, 29, 30, 32, 34, 44, 45, 46, 48, 50 *ч* после конца намачивания. Показателем второго деления служило появление тетраплоидных клеток. Для анализа зависимости время — эффект корешки фиксировали семикратно в течение первого пострадиационного митоза. Критерием радиочувствительности служила частота клеток с хромосомными аберрациями в анафазах корневой зародышевой меристемы.

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ ЧАСТЬ

Продолжительность митотического цикла при облучении семян гороха гамма-лучами в разных дозах

Известно, что в покоящихся семенах клетки зародышевой меристемы находятся в стадии интерфазы и только при прорастании семян они начинают делиться. По данным Ю. Ф. Богданова и Т. В. Боровковой (1964), деление клеток в семенах гороха сорта «Пионер» начинается не раньше, чем через 16 *ч* после начала проращивания. Вторые после облучения митозы (митозы с микроядрами, образующимися из ацентрических фрагментов) наблюдали через 44—46 *ч* после начала роста корешков. В нашем опыте границы первого после облучения митоза определяли для следующих вариантов: 1) необлученный контроль; 2) 0—1500 *рад* (семена в набухшем состоянии были облучены в дозе 1500 *рад*) и 3) 100—1500 *рад* (семена были облучены предварительно в дозе 100 *рад* в покоящемся состоянии и в дозе 1500 *рад* в конце набухания).

Таблица 1

Продолжительность митотического цикла в клетках зародышевой меристемы корешков гороха при облучении набухших семян, *ч*

Вариант		Время появления первых делящихся клеток	Время появления тетраплоидных клеток	Продолжительность митотического цикла
Предварительное облучение, *рад*	Повторное облучение, *рад*			
Контроль		25—26	48	22,5±2,0
0	1500	27—29	48	20,5±2,0
100	1500	27—28	45	17,5±2,0

Признаком вступления клеток во второе после облучения деление служило появление клеток с тетраплоидными ядрами. Интервал времени между появлением первых делящихся клеток и появлением тетраплоидных ядер служил оценкой общей продолжительности клеточного цикла. Как видно

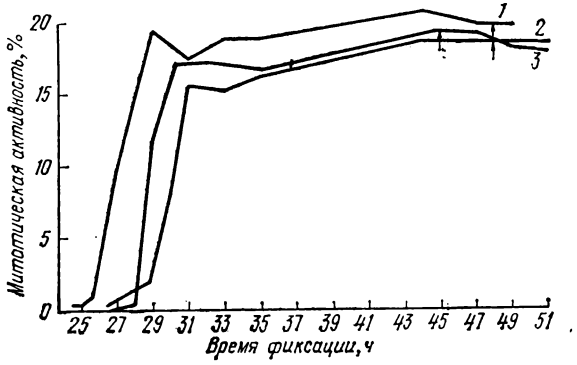


Рис. 1. Зависимость митотической активности от времени (стрелки показывают появление клеток, вступивших во второе деление).
1 — контроль; *2* — 0—1500 *рад*; *3* — 100—1500 *рад*.

из табл. 1, продолжительность клеточного цикла неодинакова в необлученном и облученном вариантах. Точность эксперимента (фиксация материала с интервалом в 2 *ч*) не позволила определить статистически значимую разницу между вариантами. Тем не менее можно было заметить, что существует некоторая тенденция к уменьшению продолжительности митотического цикла в вариантах с облучением. Полученные в настоящих опытах оценки продолжительности митотического цикла носят сугубо качественный характер и выполнены с единственной целью — сравнить этот показатель в исследуемых вариантах. Появление первых делящихся клеток и установление постоянной митотической активности при облучении семян в разных дозах наблюдается соответственно в разное время (рис. 1). Однако промежуток времени между выходом митотической активности на плато и появлением клеток с тетраплоидными ядрами для облученных вариантов примерно одинаков и составляет около 15 *ч*. В этот период количество клеток, вступающих в митоз и заканчивающих его в единицу времени, одинаково. Этот промежуток времени и был выбран для снятия кривых время — эффект.

ЗАВИСИМОСТЬ ВРЕМЯ — ЭФФЕКТ ПРИ ОБЛУЧЕНИИ СЕМЯН В РАЗНЫХ ДОЗАХ

Кривые время — эффект (рис. 2) строились в соответствии с кривыми митотической активности по семи срокам фиксации. Анализируя результаты экспериментов, мы брали не абсолютные значения, а логарифмы этих значений. Последующая обработка показала правомочность такого преобразования, посколь-

ку отклонение от линейности при вычислении коэффициентов регрессии оказалось несущественным (во всех вариантах P не менее 0,074), что оправдывает аппроксимацию зависимости время — эффект для исследуемых показателей прямой линией.

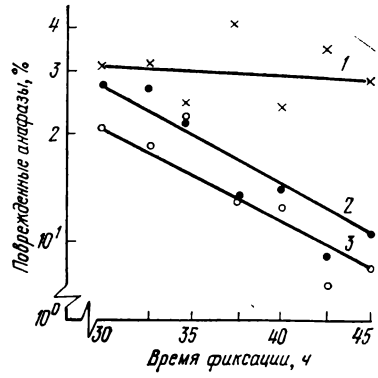


Рис. 2. Зависимость время — эффект для частоты анафаз с хромосомными аберрациями.

1 — 0—1500 *рад*; *2* — 50—1500 *рад*; *3* — 100—1500 *рад*.

Из рис. 2 видно, что число поврежденных анафаз при предварительном облучении семян в малых дозах резко убывает со временем, в то время как в варианте без предварительного облучения изменений не происходит. Для варианта с предварительным облучением коэффициенты регрессии достоверно отличаются от нуля (табл. 2). Сравнение коэффициентов регрессии для семян с предварительным облучением в дозах 50 и 100 *рад* показало, что уменьшение числа поврежденных клеток в зависимости от времени фиксации в этих вариантах одинаково ($P=0{,}38$).

Таким образом, регрессионный анализ показывает, что при предварительном облучении покоящихся семян в малых дозах уменьшение поврежденных клеток наблюдается с увеличением времени между облучением и вступлением клеток в деление. Этот вывод справедлив для процента поврежденных анафаз. Что касается различных типов хромосомных аберраций, то подобная зависимость не является очевидной. Нами анализировалась зависимость от времени для числа мостов и фрагментов (табл. 2). Обращает на себя внимание, что число ацентрических фрагментов в вариантах с предварительным облучением уменьшается с увеличением интервала времени между облучением и фиксацией. Количество же мостов остается на одном уровне, не изменяется также количество мостов и фрагментов в варианте без предварительного облучения. Различный ход кривых время — эффект для мостов и фрагментов может быть объяснен различными механизмами образования этих типов повреждений.

ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ

При облучении покоящихся семян в дозах 10 000—15 000 *рад* получен наклон кривых время — эффект относительно оси абсцисс (Лучник, Царапкин и др., 1960). Авторы объяснили наблюдаемую картину восстановлением клеток от первичных цитогенетических повреждений, протекающих в пострадиационный период.

Таблица 2

Влияние предварительного облучения на коэффициенты регрессии для зависимости различных показателей лучевого поражения от времени фиксации (облучение в дозе 1500 *рад*)

Доза предварительного облучения, *рад*	Коэффициенты регрессии	Сравнение с контролем	
		t	P
Частота клеток с хромосомными аберрациями			
0	—0,007±0,015		
50	—0,08 ±0,03	2,21	0,022
100	—0,07 ±0,02	2,10	0,042
Число фрагментов			
0	+0,008±0,003		
50	—0,066±0,025	2,53	0,01
100	—0,084±0,032	2,46	0,01
Число мостов			
0	—0,0442±0,026		
50	—0,0567±0,082	0,29	0,78
100	—0,060 ±0,042	0,31	0,74

В описанных в настоящей работе опытах набухшие семена облучались в дозе 1500 *рад*; линии регрессии в этом случае идут параллельно оси абсцисс. Однако если перед облучением набухших семян в массированной дозе облучить эти же семена в дозах 50 и 100 *рад* в покоящемся состоянии, то наблюдаемый лучевой эффект существенно изменяется, кривые время — эффект приобретают наклон относительно оси абсцисс (коэффициенты регрессии достоверно отличаются от нуля, $P \leqslant 0{,}05$). Можно полагать, что уменьшение частоты анафаз с хромосомными аберрациями при увеличении промежутка времени между облучением и наблюдением связано с восстановлением клеток от первичных цитогенетических повреждений. Таким образом, чем больше времени проходит между облучением и фиксацией, тем больше вероятность того, что клетки освободятся от повреждений, т. е. наклон кривых время — эффект при предварительном облучении покоящихся семян в малых дозах связан с процессами пострадиационного восстановления, стимулированными (активированными) дозами предварительного облучения.

Не исключены и другие объяснения кривых время — эффект. В частности, можно объяснить это элиминацией хромосомных аберраций в последующих делениях клеток. Подобная интерпретация в нашем случае исключается самой постановкой опытов, так как все наблюдаемые анафазы регистрировались только в течение первого пострадиационного митоза.

Снижение лучевого поражения клеток во времени можно объяснить также с точки зрения дифференциальной радиочувствительности разных фаз митотического цикла, предполагающей, что все изменения величины радиационного поражения связаны с различной первичной поражаемостью клеток. Если бы эффект сводился только к изменению первичной поражаемости клеток столь малыми для покоящихся семян гороха дозами (50 и 100 *рад*), то, вероятно, следовало бы ожидать, что и без предварительного облучения кривые время — эффект

имели бы наклон относительно оси абсцисс. Этого в условиях нашего опыта не наблюдается.

Необходимо подчеркнуть, что радиочувствительность — явление комплексное, в которое составляющими входят первичная поражаемость и восстановление. Вполне возможно, что конечный наблюдаемый эффект изменяется за счет вариации той и другой компоненты. Вышеописанные опыты говорят о том, что ведущая роль принадлежит процессам восстановления, протекающим в пострадиационный период, причем малые дозы, сообщенные покоящимся семенам, обладают, по-видимому, стимулирующим, или активирующим, действием.

ЛИТЕРАТУРА

Богданов Ю. Ф., Боровкова Т. В. К вопросу о радиостимуляции клеточных делений.— Радиобиология, 1964, т. 4, № 2.

Куликов Н. В., Альшиц Л. К., Позолотин А. А., Тарчевская С. В. Изменение радиочувствительности растений в результате предварительного лучевого воздействия.— Радиобиология, 1971, т. 11, № 4.

Лучник Н. В., Порядкова Н. А., Царапкин Л. С., Тимофеев-Ресовский Н. В., Изможеров Н. А. Обратимость цитогенетических повреждений, вызванных радиацией. М., Изд-во АН СССР, 1960.

СОДЕРЖАНИЕ

Е. Н. Караваева, И. В. Молчанова, Н. В. Куликов. Влияние влажности почвы на поведение стронция-90, цезия-137 и церия-144 в системе почва — раствор 3

И. В. Молчанова, Е. Н. Караваева. Роль органического вещества и почвенного увлажнения в процессе перехода цезия-137 и церия-144 из почвы в раствор 13

М. Я. Чеботина. Десорбция железа-59, кобальта-60, стронция-90 из почвы растительными экстрактами в условиях динамических опытов 16

М. Я. Чеботина. Влияние водорастворимого вещества лесной подстилки на поглощение радиоактивных изотопов в почве . . . 21

Н. В. Куликов, И. В. Молчанова, Л. И. Пискунов. Миграция стронция-90 и цезия-137 в лесных почвах 26

Е. Н. Караваева. Влияние влажности почвы на поведение стронция-90, цезия-137 и церия-144 в системе почва — растение . . 35

М. Г. Нифонтова. Экспериментальное изучение накопления цезия-137 лишайниками из водных растворов (на примере *Cladonia rangiferina* (L.) Web.) 49

С. В. Тарчевская, П. И. Юшков. Накопление и биологическое действие стронция-90 на ранних стадиях развития *Pinus silvestris* L. 55

П. И. Юшков, С. В. Тарчевская, Н. В. Куликов. Биологическое действие стронция-90 на сеянцы сосны (*Pinus silvestris* L.) в зависимости от вертикального распределения радионуклида в почве 64

В. В. Сидоров. Изменение радиочувствительности семян сосны обыкновенной (*Pinus silvestris* L.) в зависимости от продолжительности замачивания 75

Л. К. Альшиц. О характере изменения радиочувствительности семян в процессе их набухания и прорастания 82

В. В. Сидоров. Влияние гамма-излучения кобальта-60 на митотическую активность и размеры клеток в проростках сосны обыкновенной (*Pinus silvestris* L.) 90

А. А. Позолотин, Л. К. Альшиц. Изменение радиочувствительности семян гороха под влиянием малых доз гамма-облучения . 93

Л. К. Альшиц, Н. Г. Бернер, А. А. Позолотин. О возможности стимуляции системы восстановления малыми дозами ионизирующего излучения 100

УДК 577.41/46 : 577.391

Влияние влажности почвы на поведение стронция-90, цезия-137 и церия-144 в системе почва — раствор. Караваева Е. Н., Молчанова И. В., Куликов Н. В. «Радиоэкологические исследования почв и растений». Свердловск, 1975 (УНЦ АН СССР).

Экспериментально установлено, что во влажных почвах (при коэффициенте обводненности почвы менее единицы) относительная подвижность радиоизотопов в системе почва — раствор изменяется в ряду $Sr^{90} \gg Cr^{137} > Ce^{144}$. В почвенных суспензиях (коэффициент обводненности больше единицы) подвижность радиоизотопов в значительной степени выравнивается. На основании полученных данных предполагается, что в природных условиях под влиянием сезонных изменений почвенного увлажнения происходит нивелирование темпов миграции изучавшихся радиоизотопов в почвах.

Табл. 6. Илл. 4. Библ. 14 назв.

УДК 577.41/46 : 577.391

Роль органического вещества и почвенного увлажнения в процессе перехода цезия-137 и церия-144 из почвы в раствор. Молчанова И. В., Караваева Е. Н. «Радиоэкологические исследования почв и растений». Свердловск, 1975 (УНЦ АН СССР).

Авторы показали, что в условиях избыточного увлажнения (при коэффициентах обводненности дерново-луговой почвы больше 0,5) происходит частичное растворение органического вещества почвы, что в свою очередь способствует увеличению подвижности цезия-137 и церия-144 в системе почва — раствор.

Табл. 1. Илл. 1. Библ. 2 назв.

УДК 577.41/46 : 577.391

Десорбция железа-59, кобальта-60, стронция-90 из почвы растительными экстрактами в условиях динамических опытов. Чеботина М. Я. «Радиоэкологические исследования почв и растений». Свердловск, 1975 (УНЦ АН СССР).

В лабораторных условиях через почвенные колонки, содержащие изотопы железа-59, кобальта-60 и стронция-90, пропускались водные экстракты из листьев липы, осины и хвои сосны. При этом установлено, что десорбция радиоизотопов из почвы растительными экстрактами превышает десорбцию их озерной водой. Содержание радиоизотопов в фильтрате почвенных колонок уменьшается с увеличением количества объемов пропущенного раствора, что свидетельствует о различной степени закрепления радиоизотопов в почве.

Табл. 2. Илл. 2. Библ. 3 назв.

УДК 577.41/46 : 577.391

Влияние водорастворимого вещества лесной подстилки на поглощение радиоактивных изотопов в почве. Чеботина М. Я. «Радиоэкологические исследования почв и растений». Свердловск, 1975 (УНЦ АН СССР).

Изучалось влияние лизиметрических вод и центрифугатов из подстилок различных типов естественных лесных биогеоценозов на сорбцию железа-59, кобальта-60, стронция-90, иттрия-91, цезия-137 и церия-144 дерново-луговой почвой. Центрифугаты снижают сорбцию радиоизотопов почвой сильнее, чем лизиметрические воды, что, по-видимому, обусловлено более высоким содержанием в них растворенных органических и минеральных веществ по сравнению с лизиметрическими водами.

Табл. 2. Библ. 7 назв.

УДК 577.41/46 : 577.391

Миграция стронция-90 и цезия-137 в лесных почвах. Куликов Н. В., Молчанова И. В., Пискунов Л. И. «Радиоэкологические исследования почв и растений». Свердловск, 1975 (УНЦ АН СССР).

Авторы экспериментальным путем установили, что через четыре года после внесения стронция-90 и цезия-137 в лесную подстилку вертикальное распределение радиоизотопов в почвах лесных биогеоценозов удовлетворительно аппроксимируется экспоненциальной зависимостью, что указывает на преобладание процессов диффузии изотопов в почве над другими механизмами миграции. В условиях проведенного эксперимента эффективные коэффициенты диффузии для стронция-90 составили в среднем $2{,}5 \cdot 10^{-8}$ *см²/сек*, а для цезия-137—$1{,}5 \cdot 10^{-8}$ *см²/сек*, скорость диффузии 0,8—0,5 *см/год* соответственно.

Табл. 4. Илл. 2. Библ. 15 назв.

УДК 577.41/46 : 577.391

Влияние влажности почвы на поведение стронция-90, цезия-137 и церия-144 в системе почва — растение. Караваева Е. Н. «Радиоэкологические исследования почв и растений». Свердловск, 1975 (УНЦ АН СССР).

В серии вегетационных опытов с девятью видами растений на трех разных по физико-химическим свойствам почвах показано, что с повышением увлажненности почв от уровня влажности завядания до полной влагоемкости вынос радиоизотопов надземной массой растений увеличивается. Такое увеличение выноса изотопов обусловлено в основном возрастанием биомассы растений на более увлажненной почве. Концентрация изотопов в растениях, как правило, остается постоянной.

Табл. 8. Илл. 6. Библ. 9 назв.

УДК 577.41/46 : 577.391

Экспериментальное изучение накопления цезия-137 лишайниками из водных растворов (на примере *Cladonia rangiferina* L. (Web.) Нифонтова М. Г. «Радиоэкологические исследования почв и растений». Свердловск, 1975 (УНЦ АН СССР).

В лабораторных условиях изучалось накопление цезия-137 из водных растворов слоевищами лишайника *Cladonia rangiferina* в зависимости от физиологического состояния и биомассы слоевищ в водной среде. Показано, что слоевища лишайника обладают достаточно высокой способностью к накоплению радионуклида, при этом накопление цезия не зависит от степени первоначального увлажнения слоевищ. Коэффициенты накопления цезия-137 у мертвых лишайников на два порядка величин ниже, чем у живых (влажных и сухих) слоевищ. Скорость поглощения радионуклидов находится в прямой зависимости от биомассы лишайника в водной среде.

Илл. 3. Библ. 12 назв.

УДК 577.41/46 : 577.391

Накопление и биологическое действие стронция-90 на ранних стадиях развития *Pinus silvestris* L. Тарчевская С. В., Юшков П. И. «Радиоэкологические исследования почв и растений». Свердловск, 1975 (УНЦ АН СССР).

Приводятся результаты длительных вегетационных опытов по изучению влияния стронция-90, при разных уровнях содержания его в почве, на рост и развитие сеянцев сосны.

Установлено, что при концентрации стронция-90 в 1 *мкюри/кг* почвы происходит сильное угнетение и задержка роста молодых сеянцев сосны с летальным исходом на второй год после посева семян. При концентрации

0,1 и 0,01 *мкюри/кг* почвы угнетающее действие проявляется на четвертый год жизни сеянцев, но без летального исхода. При концентрации стронция-90 в почве 0,001 *мкюри/кг* рост и развитие сеянцев не отличались от контроля.

Показано также, что накопление стронция-90 в сеянцах сосны находится в прямой зависимости от содержания его в почве.

Табл. 1. Илл. 9. Библ. 11 назв.

УДК 577.41/46 : 577.391

Биологическое действие стронция-90 на сеянцы сосны (*Pinus silvestris* L.) **в зависимости от вертикального распределения радионуклида в почве.** Юшков П. И., Тарчевская С. В., Куликов Н. В. «Радиоэкологические исследования почв и растений». Свердловск, 1975 (УНЦ АН СССР).

В вегетационных опытах исследовалось влияние концентрации стронция-90 в почве и распределения его по почвенному профилю на всхожесть семян, развитие сеянцев сосны обыкновенной и накопление ими радионуклида.

Показано, что при одинаковом содержании стронция-90 в почве на единицу площади (15 *мкюри/м*^{2}) лучевое поражение семенного возобновления сосны выше в том случае, когда изотоп сконцентрирован в самых верхних слоях почвы. Опасность радиационного поражения всходов сосны возрастает, если под влиянием каких-либо неблагоприятных факторов среды тормозится рост молодых сеянцев. В условиях опыта накопление и распределение стронция-90 в сеянцах сосны не зависело существенно от вертикального распределения радионуклида в почве.

Табл. 4. Илл. 12. Библ. 7 назв.

УДК 577.41/46 : 577.391

Изменение радиочувствительности семян сосны обыкновенной (*Pinus silvestris* L.) **в зависимости от продолжительности замачивания.** Сидоров В. В. «Радиоэкологические исследования почв и растений». Свердловск, 1975 (УНЦ АН СССР).

Автор изучал влияние продолжительности замачивания семян сосны обыкновенной на их радиочувствительность. В качестве критериев радиационного поражения брались митотическая активность и число клеток с хромосомными аберрациями в анафазе и телофазе меристематических клеток корней в период первого митотического цикла. Установлено, что с увеличением дозы облучения радиационное поражение усиливается как у проростков из семян, облученных в набухшем состоянии, так и у проростков из воздушно-сухих семян. Проростки семян, облученных в набухшем состоянии, более чувствительны к воздействию облучения, чем проростки из семян, облученных до замачивания.

Табл. 1. Илл. 5. Библ. 10 назв.

УДК 577.41/46 : 577.391

О характере изменения радиочувствительности семян в процессе их набухания и прорастания. Альшиц Л. К. «Радиоэкологические исследования почв и растений». Свердловск, 1975 (УНЦ АН СССР).

Исследовалась чувствительность семян гороха к гамма-лучам радиокобальта в процессе набухания и прорастания. Использованы дозы 800 и 5000 *рад*. Критерием радиочувствительности служили хромосомные аберрации, учитываемые в анафазах корневой зародышевой меристемы в первом пострадиационном митозе.

Установлено, что при облучении развивающихся семян от покоящегося состояния до появления проростков лучевой эффект возрастает в 7—10 раз. Столь резкое изменение радиочувствительности связано с вариацией как

первичной поражаемости, так и восстановления их от первичных цитогенетических повреждений в пострадиационный период, причем процессам восстановления принадлежит ведущая роль.

Табл. 2. Илл. 5. Библ. 7 назв.

УДК 577.41/46 : 577.391

Влияние гамма-излучения кобальта на митотическую активность и размеры клеток в проростках сосны обыкновенной (*Pinus silvestris* L.). Сидоров В. В. «Радиоэкологические исследования почв и растений». Свердловск, 1975 (УНЦ АН СССР).

В лабораторных условиях изучено действие гамма-излучения кобальта-60 на рост и деление клеток. В качестве критериев радиационного поражения учитывались митотическая активность, размеры клеток и длина проростков. Установлено, что облучение семян в дозе 75 *рад* вызывает увеличение митотической активности корешков проростков сосны, временное уменьшение размеров клеток в меристематической ткани и приводит к изменению длины проростков. Облучение семян в дозах 250, 500, 1000 *рад* не оказывает существенного влияния на рост проростков. Увеличение дозы облучения до 2000—2500 *рад* значительно снижает митотическую активность; размеры клеток при этом увеличиваются, а длина проростков уменьшается.

Табл. 1. Илл. 2. Библ. 3 назв.

УДК 577.41/46 : 577.391

Изменение радиочувствительности семян гороха под влиянием малых доз гамма-облучения. Позолотин А. А., Альшиц Л. К. «Радиоэкологические исследования почв и растений». Свердловск, 1975 (УНЦ АН СССР).

Изложены результаты опытов по изучению действия предварительного облучения гамма-лучами кобальта-60 на последующую радиочувствительность семян гороха. Критерием радиочувствительности служили хромосомные аберрации в анафазах корневой зародышевой меристемы.

Предварительное облучение покоящихся семян в дозах 50 и 100 *рад* снижает лучевое поражение при последующем облучении в дозе 1500 *рад* этих же семян в набухшем состоянии почти в два раза. Показано, что эффект радиационно-индуцированной радиорезистентности (ЭРИР) зависит от соотношения величин доз предварительного и повторного облучений.

Табл. 3. Илл. 3. Библ. 9 назв.

УДК 577.41/46 : 577.391

О возможности стимуляции системы восстановления малыми дозами ионизирующего излучения. Альшиц Л. К., Бернер Н. Г., Позолотин А. А. «Радиоэкологические исследования почв и растений». Свердловск, 1975 (УНЦ АН СССР).

Описано изучение проявления эффекта радиационно-индуцированной радиорезистентности (ЭРИР) во времени по частоте анафаз с хромосомными аберрациями.

При облучении набухших семян только в дозе 1500 *рад* линии регрессии идут параллельно оси абсцисс. Если же семена в покоящемся состоянии облучать в дозах 50 и 100 *рад*, а затем в набухшем состоянии в дозе 1500 *рад*, то линии регрессии образуют наклон относительно оси абсцисс.

Наблюдаемая картина связана с процессами пострадиационного восстановления, активированными предварительным облучением.

Табл. 2. Илл. 2. Библ. 3 назв.

РАДИОЭКОЛОГИЧЕСКИЕ ИССЛЕДОВАНИЯ ПОЧВ И РАСТЕНИЙ

Труды Института экологии растений и животных, вып. 95

Утверждено к печати
Редакционно-издательским советом
Уральского научного центра АН СССР

Редакторы *А. М. Хазрятов, Н. И. Гладких*
Художник *М. Н. Гарипов*
Техн. редактор *М. К. Устюгова*
Корректор *Л. А. Урядова*

РИСО № 659—22(75). Сдано в набор 30/IX 1974 г. Подписано к печати 29/V 1975 г. НС 19354. Формат 60×90/16. Усл.-печ. л. 7. Уч.-изд. л. 7,8. Бумага типографская № 2. Заказ 563. Цена 78 коп. Тираж 1000.

РИСО УНЦ АН СССР, Свердловск, К-49, Первомайская, 91.
Типография изд-ва «Уральский рабочий»,
г. Свердловск, пр. Ленина, 49.

ЗАМЕЧЕННЫЕ ОПЕЧАТКИ

Стр.	Строка	Напечатано	Следует читать
64	4-я снизу	600 *мкюри*	600 *мккюри*
	2-я »	15 *мккюри*	15 *мкюри*
80	17-я »	количества семян	количества клеток
83	18-я »	из чашки	на чашки

Заказ 563 Тираж 1000