АКАДЕМИЯ НАУК СССР
УРАЛЬСКИЙ ФИЛИАЛ

ВЫП. 22 ТРУДЫ ИНСТИТУТА БИОЛОГИИ 1962

СБОРНИК РАБОТ ЛАБОРАТОРИИ БИОФИЗИКИ

IV

РАДИОАКТИВНЫЕ ЗАГРЯЗНЕНИЯ БИОСФЕРЫ И МЕРЫ БОРЬБЫ С НИМИ

СВЕРДЛОВСК

Печатается по постановлению
Редакционно-издательского совета
Уральского филиала АН СССР

СБОРНИК РАБОТ
ЛАБОРАТОРИИ БИОФИЗИКИ
IV

ОТВЕТСТВЕННЫЙ РЕДАКТОР
проф. доктор с.-х. наук В. Н. ПЕТРИ

Технический редактор *Н. Ф. Середкина*
Корректоры *П. В. Винокурова, Н. М. Пучкова, Г. Е. Никитюк*

РИСО УФАН СССР № 15/1(36). Сдано в набор 27/X 1960 г. Подписано к печати 16/VIII 1962 г.
НС 25280 Формат 70×108¹/₁₆ Печ. л. 5,75 Уч.-изд. л. 7,4 Тираж 1200. Заказ № 419. Цена 52 коп.

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

АКАДЕМИЯ НАУК СССР
УРАЛЬСКИЙ ФИЛИАЛ

ВЫП. 22 ТРУДЫ ИНСТИТУТА БИОЛОГИИ 1962

Е. А. ТИМОФЕЕВА-РЕСОВСКАЯ,
Б. М. АГАФОНОВ и Н. В. ТИМОФЕЕВ-РЕСОВСКИЙ

О СУДЬБЕ РАДИОИЗОТОПОВ В ВОДОЕМАХ

I. ВВЕДЕНИЕ

§ 1. Водоемы, наряду с почвами и населяющими их фитоценозами представляют наибольший интерес в отношении судьбы излучателей, попадающих в природные биогеоценозы (Сукачев, 1945, 1947, 1948, 1949, 1950; Тимофеев-Ресовский, 1957; Тимофеев-Ресовский, Порядкова, Сокурова и Тимофеева-Ресовская, 1957). Кроме того, изучение миграции, распределения и концентрации радиоактивных изотопов в основных живых и косных компонентах водоемов является особенно важным для понимания процессов естественной биологической очистки радиоактивно загрязненных промышленных и сточных вод (Агафонов, 1956; Тимофеев-Ресовский, 1957; Тимофеева-Ресовская, 1956, 1957). Наконец, с точки зрения охраны природы и разработки общих принципов развития разумных взаимоотношений между развивающейся промышленностью и естественными (в особенности биологическими) производительными силами Земли, природные воды, в частности пресноводные водоемы, являются, с одной стороны, наиболее угрожаемыми и быстрее всего подвергающимися загрязнениям и интоксикациям, а с другой стороны, одними из наиболее ценных и в первую очередь подлежащих охране природных объектов.

§ 2. В настоящей статье будут, на основании проведенных до сих пор в нашей лаборатории опытов, кратко описаны: а) основные черты распределения важнейших радиоактивных изотопов по главным компонентам пресноводных водоемов (вода, грунт и биомасса); б) концентрация и накопление их различными представителями пресноводной флоры и фауны и в) экспериментальные основы биологического метода дезактивации радиоактивно загрязненных вод в слабо проточных водоемах.

II. РАСПРЕДЕЛЕНИЕ ИЗЛУЧАТЕЛЕЙ ПО ОСНОВНЫМ КОМПОНЕНТАМ ВОДОЕМА

§ 3. Изучение распределения различных радиоактивных изотопов между водой, грунтом и биомассой водоема производится следующим образом. В водоем того или иного размера (аквариум с грунтом, расте-

ниями и планктоном, слабопроточные или непроточные более крупные баки, небольшие экспериментальные пруды) однократно или повторно вносится в воду тот или иной радиоактивный изотоп в слабой концентрации (0,1—25 *мккюри/л* воды). Как при однократном, так и при повторном внесении или пропускании радиоактивного раствора через слабопроточные водоемы, через определенное время устанавливается некоторое статическое равновесие между концентрациями радиоактивного изотопа в воде, грунте и биомассе, типичное для каждого данного химического элемента или группы элементов. В лабораторных и полулабораторных опытах с аквариумами и небольшими водоемами в конце опыта может быть произведен полный баланс радиоактивности: взвешивается общее количество воды, грунта и биомассы водоема, на ряде аликвотных проб измеряется концентрация радиоизотопа в этих компонентах и, путем простого расчета (зная общий вес компонента и концентрацию в нем радиоизотопа) определяется общее содержание радиоизотопа в воде, грунте и биомассе водоема. Вес каждого компонента водоема и содержание радиоизотопа в воде, грунте и биомассе выражается в процентах, соответственно, от общего веса и общего содержания радиоизотопа суммы всех компонентов. Такая обработка результатов этих опытов дает ясное представление об общем характере распределения изучаемых радиоактивных изотопов между водой, грунтом и биомассой пресноводного водоема.

§ 4. В отношении распределения между водой, грунтом и биомассой водоемов до сих пор нами изучены радиоактивные изотопы фосфора, серы, железа, кобальта, цинка, германия, стронция, иттрия, циркония, ниобия, рутения, йода, цезия и церия. Каждый из этих элементов имеет свои характерные особенности поведения в водоеме. Однако по общему характеру распределения по компонентам водоемов, они могут быть разбиты на 4 основные группы: а) гидротропные (остающиеся в относительно высоких концентрациях в воде); б) равномерно распределяющиеся (к концу опыта содержащиеся в заметных концентрациях как в воде, так и в грунте и биомассе); в) педотропные (т. е. содержащиеся к концу опыта в наибольшем количестве в грунте) и г) биотропные (т. е. в большем количестве поступающие в биомассу). Типичным представителем первой (гидротропной) группы является сера; к ней же относится, в до сих пор изученных химических формах, германий. Вторая группа (равномерная) представлена стронцием и рутением, которые, хотя и накапливаются в заметных количествах в биомассе, но благодаря меньшему, по сравнению с большинством других элементов, накоплению в грунте, остаются в заметных количествах в воде. Третья группа (педотропная) представлена цезием и к ней же относится цинк и отчасти железо и кобальт; в воде их остается очень мало, основная

Таблица 1

Распределение радиоизотопов по основным компонентам водоемов

Радиоизотопы	Компоненты водоема		
	вода	грунт	биомасса
Фосфор-32 . .	6,0	33,4	60,6
Сера-35	92,0	2,2	5,8
Железо-59 . .	2,8	79,6	17,6
Кобальт-60 . .	22,0	58,0	20,0
Цинк-65 . . .	4,4	76,7	18,9
Германий-71 .	69,8	27,6	2,6
Стронций-90 .	47,9	26,3	25,8
Иттрий-91 . .	12,0	49,0	39,0
Цирконий-95 .	13,0	43,0	44,0
Ниобий-95 . .	20,1	44,3	35,6
Рутений-106 . .	26,3	44,3	29,4
Йод-131 . . .	12,4	29,0	58,6
Цезий-137 . . .	5,8	91,7	2,5
Церий-144 . .	8,0	37,0	55,0
Распределение масс компонентов . . .	84,05	15,90	0,05

же масса этих элементов концентрируется в грунте. Наконец, типичными представителями четвертой (биотропной) группы являются церий, а также фосфор, иттрий, цирконий и ниобий; эти элементы в особенно большом количестве концентрируются в биомассе. В табл. 1 приведено процентное распределение 14 различных радиоизотопов между водой, грунтом и биомассой водоемов, а на рис. 1 наглядно изображено распределение типичных представителей (сера, стронций, цезий и церий) вышеупомянутых четырех типов распределения. Как в таблице, так и на рисунке, наряду с процентами радиоактивности, содержащейся в воде, грунте и биомассе, приведены и веса этих компонентов в процентах общего веса всей воды, грунта и биомассы водоема. По весу на первом месте стоит вода, а биомасса составляет лишь долю процента от общего веса всей системы; по радиоактивности же во всех случаях процентное участие биомассы значительно, а иногда неизмеримо выше, чем по весу. Из этого следует, что живые организмы обладают большой способностью концентрировать и накапливать микроэлементы из водного раствора; это составляет предмет описываемых ниже специальных опытов по определению коэффициентов накопления различных радиоактивных изотопов разными группами и видами пресноводных организмов.

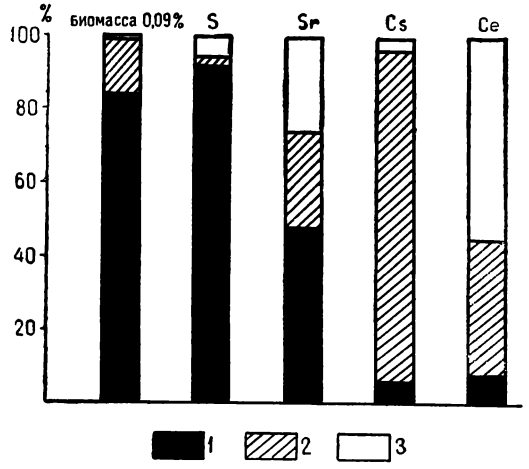

Рис. 1. Распределение радиоактивных изотопов серы, стронция, цезия и церия между водой, грунтом и биомассой водоемов в процентах от общей радиоактивности. Первый столбик — распределение массы этих компонентов в процентах от общего веса.
1 — вода; *2* — грунт; *3* — биомасса.

§ 5. Мы еще относительно мало знаем о различных механизмах, определяющих тот или иной тип распределения элементов по компонентам водоемов. Совершенно ясно, что тип распределения в первую очередь определяется; а) физико-химической формой, в которой данный радиоизотоп попадает в природную воду; б) химическим составом и активной реакцией природных вод и в) характером связей (поверхностно-адсорбционные, ионные, химические, комплексные и т. д.), в которые радиоизотоп вступает с твердыми фазами грунтов и живых организмов, а также динамикой этих процессов. По отношению к стронцию ясна роль кальция, содержащегося в воде, грунтах и биомассе, с которым стронций легко вступает в ионный обмен; педотропность цезия, кобальта, железа и цинка, возможно, объясняется крепостью и необратимостью соединений этих элементов с твердыми минеральными и органическими фазами грунтов при микроконцентрациях (Титлянова и Тимофеева, 1959). Высокие-коэффициенты накопления в биомассе объясняются «асимметричным обменом», т. е. относительной легкостью поступления микроколичеств химических элементов в организм и весьма медленным их выделением; возможно, что частично это объясняется прочным связыванием их присутствующими в организмах биокомплексонами (Семенов, 1957, 1958; Тимофеева-Ресовская и Тимофеев-Ресовский, 1959). Дальнейшее точное изучение сорбции и десорбции различных радиоизотопов в

грунтах и почвах, а также коэффициентов накопления различными организмами при разных условиях поможет в будущем выявить основные механизмы и закономерности, управляющие судьбой и распределением различных излучателей, попадающих в водоемы. Например, в опытах с изменениями pH воды оказалось, что на распределение стронция и церия отклонение pH от нормы как в кислую сторону (особенно по отношению к стронцию), так и в щелочную (особенно по отношению к церию) довольно резко влияет на распределение, оставляя больший процент радиоактивности в воде. На распределение цезия, однако, вариации pH в тех же пределах не оказывают существенного влияния.

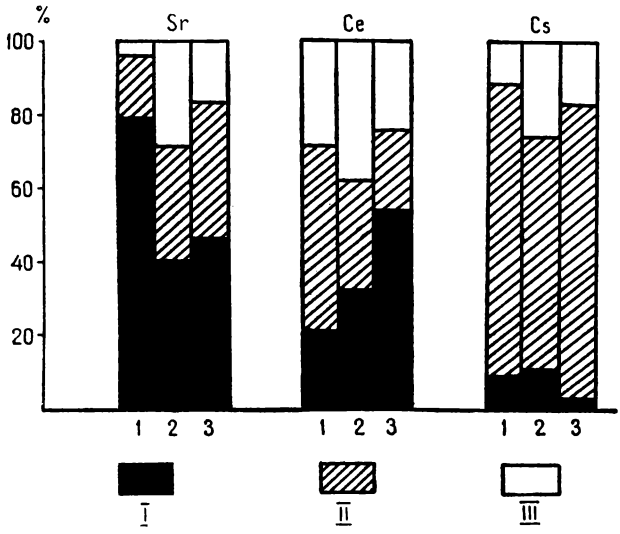

Рис. 2. Распределение радиоактивных изотопов стронция, цезия и церия между водой, грунтом и биомассой водоемов в процентах от общей радиоактивности при различных pH воды.

1 — «кислая серия» (pH = 6,0 — 6,5); *2* — «нормальная серия» (pH = 8,0 — 8,5); *3* — «щелочная серия» (pH = 9,0 — 9,5). *I* — вода; *II* — грунт; *III* — биомасса.

Результаты этих опытов изображены на рис. 2. Установление таких чисто эмпирических обобщений, как приведенные выше типы распределения, для достаточного числа практически наиболее важных радиоизотопов уже позволяет, до известной степени, делать приближенные прогнозы их судьбы при попадании в водоем.

§ 6. Следует, наконец, подчеркнуть, что через относительно большие отрезки времени после прекращения поступления радиоизотопов в водоем, постепенно возрастает их количество в поверхностных слоях донных отложений; они все время поступают туда с детритом, осаждающимися неорганическими частицами и более крупными остатками отмирающей биомассы. Параллельно, конечно, происходит постоянное частичное перераспределение: в незначительном количестве обратное поступление в водный раствор (весьма различное для разных элементов), а также новое накопление из донных отложений укореняющимися растениями и организмами бентоса. Новые поступления в биомассу, по мере ее отмирания, опять возвращаются в донные отложения, и лишь ничтожная часть выносится из водоема имагинальными стадиями вод-

ных насекомых и различными животными (преимущественно птицами), питающимися живыми организмами, населяющими водоем, и их органическими остатками. В результате постоянного протекания такого неполного круговорота происходит постепенное захоронение практически почти всей радиоактивности в донных отложениях. Само собой разумеется, что этот процесс захоронения протекает сравнительно быстро для радиоизотопов, принадлежащих к третьей и четвертой из упомянутых выше групп (§ 4), медленнее для второй и еще медленнее для элементов первой группы.

III. КОЭФФИЦИЕНТЫ НАКОПЛЕНИЯ РАДИОИЗОТОПОВ ПРЕСНОВОДНЫМИ ОРГАНИЗМАМИ

§ 7. Выше уже упоминалось, что концентрация всех изученных радиоизотопов оказывается в биомассе выше, а для большинства много выше, чем в грунте и в воде (§ 4). Из этого следует, что живые организмы обладают в высокой степени способностью концентрировать и накапливать все, или почти все химические элементы, находящиеся в воде в ничтожных концентрациях; по отношению к естественным радиоактивным изотопам это уже 30 лет назад было показано В. И. Вернадским (Вернадский, 1929; Вернадский и Виноградов, 1931; Бруновский и Кунашева, 1935). То же самое следует из проводившихся в разное время и разными исследователями определений концентраций различных химических элементов в воде и в разных водных организмах; концентрации всех редких и рассеянных элементов природных вод оказываются в организмах во много раз выше, чем в воде (Виноградов, 1935—1944; Зенкевич, 1951; Зернов, 1949). По отношению к радиоактивным изотопам, применяя метод меченых атомов, можно легко и точно устанавливать степень и темпы их накопления различными живыми организмами. Степень накопления определенного радиоизотопа данным видом пресноводных организмов можно количественно выражать в виде коэффициента накопления, являющегося отношением концентраций данного радиоизотопа в организме и в воде (т. е. показывающего, во сколько раз концентрация в организме выше, чем в воде). Коэффициенты накопления, таким образом, показывают, на каком уровне (благодаря упоминавшемуся в § 5 «асимметричному обмену») может поддерживаться разница в концентрациях данных микроэлементов в организме и окружающей воде. Определяются коэффициенты накопления весьма просто: либо однократным внесением в воду аквариума данного радиоизотопа, либо поддержанием в воде определенной низкой концентрации радиоизотопа, с последующими измерениями его концентраций в воде и в живых организмах до установления некоторого динамического равновесия между этими концентрациями.

§ 8. Вышеописанным методом в нашей лаборатории определялись коэффициенты накопления 14 различных радиоизотопов в целом ряде опытов на водных бактериях, водорослях, сообществах перифитона, высших водных растениях и некоторых пресноводных беспозвоночных (Тимофеева-Ресовская, Попова и Поликарпов, 1958; Тимофеева-Ресовская и Тимофеев-Ресовский, 1958; Тимофеева-Ресовская, Тимофеева и Тимофеев-Ресовский, 1958; Милютина и Тимофеева-Ресовская, 1959; Гецова, Ляпунова, Поликарпов и Тимофеева-Ресовская, 1961; Гецова и Волкова, 1961; Жарова, 1961; Субботина и Тимофеев-Ресовский, 1961). Для некоторых видов определены коэффициенты накопления лишь немногих отдельных радиоизотопов, а для германия и йода определены коэффициенты накопления лишь несколькими отдельными ви-

дами пресноводных организмов. Результаты более обширных систематических и повторных опытов с радиоизотопами 15 различных химических элементов (фосфора, серы, железа, кобальта, цинка, стронция, иттрия, циркония, ниобия, рутения, цезия и церия) на 30 видах пресноводных растений и 17 видах пресноводных беспозвоночных приведены в табл. 2 и 3. Из этих таблиц видно, что: а) коэффициент накопления у водных растений, от бактерий до высших, в общем значительно выше, чем у пресноводных животных; б) коэффициенты накопления разных элементов в среднем по всем изученным организмам весьма резко отличаются

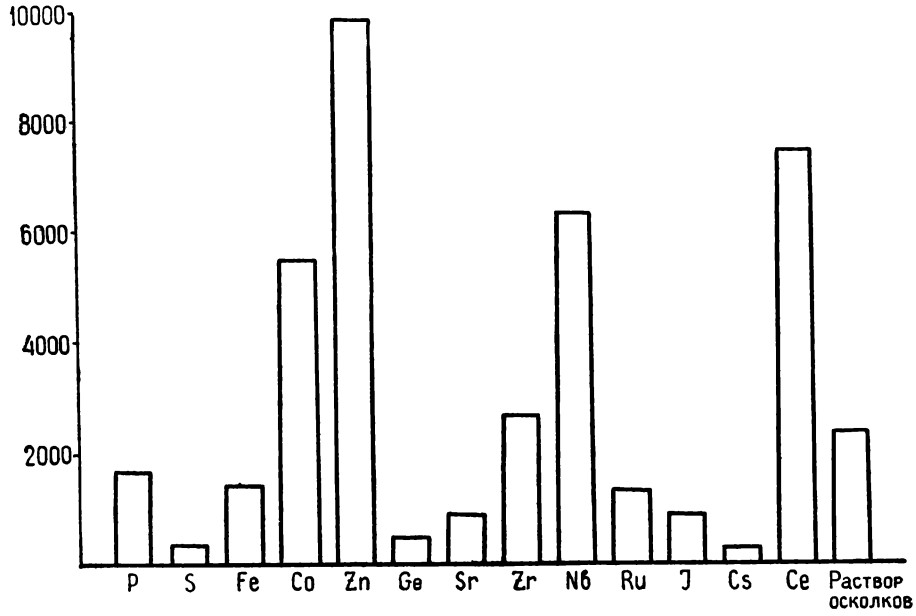

Рис. 3. Коэффициенты накопления различных радиоизотопов пресноводным растением *Elodea canadensis*.

друг от друга, варьируя, например, для серы от единиц до нескольких сотен, а для церия и иттрия от сотен до десятков тысяч (среди других фосфор, железо, цинк, цирконий и ниобий дают в большинстве случаев высокие и кобальт несколько более низкие, а стронций, рутений и, в особенности, цезий еще более низкие коэффициенты накопления); в) в среднем по коэффициентам накопления разные виды и группы организмов могут сильно отличаться друг от друга (например, ряска и элодея, аплекса и анадонта), а некоторые виды выделяются среди близких особенно высокими коэффициентами накопления по отдельным определенным элементам (например, бактерии *Lemna* и *Radix ovata* по церию, *Chara* по цирконию, *Aplexa* по фосфору, *Stigeoclonium, Bithynia, Diaptomus* и *Chydorus* по цезию, *Stigeoclonium* и *Limnaea* по стронцию). На рис. 3 и 4 наглядно, в виде колонок, изображены различия по коэффициентам накопления между разными радиоизотопами у элодеи (рис. 3) и у прудовика (рис. 4).

§ 9. Мы еще далеки от ясного представления о тех конкретных механизмах, которые определяют коэффициенты накопления разных элементов различными видами живых организмов. Следует, однако, отметить известный параллелизм между упоминавшимися выше (§ 4) типами

Таблица 2

Средние коэффициенты накопления различных радиоизотопов разными пресноводными растениями

Организмы	Сера-35	Кальций-45	Железо-59	Кобальт-60	Цинк-65	Германий-71	Рубидий-86	Стронций-90	Иттрий-91	Цирконий-95	Ниобий-95	Рутений-106	Йод-131	Цезий-137	Церий-144
Водные бактерии	—	—	—	—	—	—	—	440	—	—	—	855	—	100	11395
Scenedesmus quadricauda, Breb.	—	—	—	—	—	—	—	130	—	—	—	3000	—	280	20700
Stigeoclonium sp.	—	—	—	—	—	—	—	1910	—	—	—	2555	—	1230	35600
Cladophora glomerata (L. Kutz.)	165	335	31500	1985	3900	—	2275	960	—	—	—	1220	—	1015	2655
Spirogyra sp.	795	175	3120	5640	31500	—	2325	450	—	—	—	2560	—	1920	11880
Chara sp.	85	480	—	—	4600	—	—	350	3790	3840	8020	815	—	200	4120
Chara aspera Wild.	45	345	—	—	2270	—	170	280	5825	6920	12850	1200	—	180	6800
Chara fragilis Desw.	60	330	15500	7425	2860	—	—	400	6335	14150	4885	3750	—	365	19510
Ricciocarpus natans L.	—	285	—	—	19000	—	2875	590	20425	8560	20500	2430	—	715	9800
Fontinalis sp.	—	—	—	—	—	—	—	360	—	—	—	3320	—	1020	9650
Ranunculus conferoides	—	285	—	—	2460	130	1305	465	—	6790	11430	1550	—	765	7880
Myriophyllum spicatum L.	40	220	530	3500	3980	245	420	445	4710	1965	6000	885	410	295	4100
Ceratophyllum demersum L.	55	215	4510	4665	4740	105	645	510	920	5280	2340	1900	510	300	11250
Lythrum sp.	—	—	—	—	—	—	—	50	—	—	—	—	—	185	—
Cicuta virosa L.	—	—	—	—	—	—	—	130	—	—	—	165	—	140	—
Utricularia vulgaris L.	30	185	—	—	3900	—	1285	665	6935	2800	16500	1885	—	340	6050
Typha angustifolia L.	—	—	—	—	—	—	—	25	—	—	—	—	—	20	—
Calta palustris L.	—	—	—	—	—	—	—	45	—	—	—	210	—	70	—
Lemna minor L.	200	235	9050	3900	8250	—	1230	400	4425	6930	6670	2810	285	2405	15000
Lemna trisulca L.	75	250	—	—	28300	—	1365	315	6170	3660	15890	2920	—	940	10500
Lemna polyrrhyza L.	95	290	—	—	6100	—	1170	590	8435	6180	5200	3325	—	1050	5520
Potamogeton natans L.	—	—	—	—	—	—	—	670	—	—	950	1055	—	205	1370
Potamogeton compressus L.	—	—	—	—	—	—	665	1020	—	—	3800	1190	—	115	2435
Potamogeton filiformis Pers.	50	425	—	—	8060	—	685	585	11670	2445	725	1990	—	185	3255
Potamogeton perfoliatus L.	65	485	—	—	5800	—	310	685	4740	1725	1110	750	105	195	1925
Elodea canadensis Rich.	105	500	4735	3490	3110	705	500	805	2120	3600	5040	1125	535	285	5300
Vallisneria spiralis L.	—	—	—	—	—	—	—	220	—	—	—	270	—	360	7100
Stratiotes aloides	—	—	—	—	—	—	—	615	—	—	—	—	—	375	—
Hydrocharis morsus ranae L.	120	410	—	—	6900	—	975	415	5000	1535	2925	885	—	535	2485
Осока	95	330	6865	4595	7245	350	950	160	6535	4925	5440	—	370	100	—

Таблица 3

Средние коэффициенты накопления различных радиоизотопов разными пресноводными беспозвоночными животными

Организмы	Фосфор-32	Сера-35	Железо-59	Кобальт-60	Цинк-65	Германий-71	Рубидий-86	Стронций-90	Иттрий-91	Цирконий-95	Ниобий-95	Рутений-106	Йод-131	Цезий-137	Церий-144
Моллюски															
Herpobdella sp.	—	4	330	275	125	—	—	8	145	90	480	30	—	10	125
Anodonta cellensis	165	—	—	1090	—	—	—	85	—	455	275	170	—	90	370
Limnaea stagnalis	2530	—	125	325	155	70	75	3100	2020	270	420	130	20	215	2180
Radix auricularia	1740	—	—	—	220	—	—	60	—	—	—	100	—	550	1050
Radix ovata	2400	—	—	—	—	—	—	320	—	—	—	295	—	390	7130
Galba palustris	20800	—	—	—	—	—	—	585	—	—	—	100	—	—	—
Bithynia leachi	3180	—	—	—	345	—	—	120	—	—	—	340	—	1360	3300
Aplexa hypnorum	35600	35	720	1380	165	—	—	505	—	530	—	290	—	510	7220
Ракообразные															
Diaptomus graciloides	—	—	—	—	—	—	—	90	—	1660	—	1670	—	1270	6460
Mesocyclops sp.	—	—	—	—	—	—	—	170	—	—	—	710	—	530	—
Chydorus sphaericus	—	—	—	—	—	—	—	370	—	—	—	2250	—	1020	—
Gammarus pulex	85	—	—	1100	1820	65	290	400	—	—	—	440	—	235	1580
Личинки насекомых:															
стрекоз	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	125	—	105	2870
ручейников	—	5	1170	9550	—	—	—	225	—	960	—	980	—	165	1220
комаров	—	—	—	—	—	—	—	1015	—	—	—	1585	—	195	3500
Рыба — гибрид (карп × амурский сазан)	—	—	—	60	—	6	135	160	—	—	—	80	10	55	820
Головастик *Rana*	—	—	—	—	—	630	—	210	—	—	—	1510	1275	—	70100

распределения и средними коэффициентами накопления различных элементов; первая, гидротропная группа элементов (сера) дает весьма низкие коэффициенты накопления; биотропные и часть педотропных металлов дают весьма высокие, а остальные средние коэффициенты накопления. Естественно, что такие сложные и комплексные системы, какими являются системы минерального обмена живых организмов, дают целый ряд «исключений» из общей феноменологической закономерности; эти исключения выражаются в наличии среди живых организмов «специфических накопителей» почти любых отдельных элементов (§ 8). Нахож-

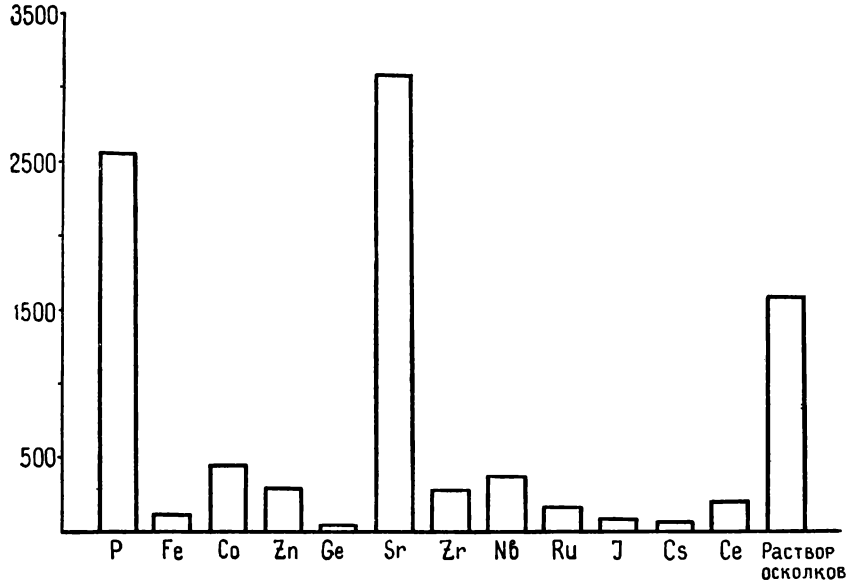

Рис. 4. Коэффициенты накопления различных радиоизотопов прудовиком *Limnaea stagnalis*.

дение таких «специфических накопителей» среди различных видов живых организмов представляет большой интерес с точки зрения использования их в качестве биоиндикаторов наличия в окружающей среде ничтожных концентраций определенных элементов, а, может быть, в будущем и для своего рода промышленно-биологического добывания некоторых рассеянных и редких элементов.

§ 10. Изучение влияния ряда сопутствующих факторов (таких, как физико-химическая форма попадающих в воду радиоизотопов, химический состав и pH воды, присутствие комплексонов и т. д.) на коэффициенты накопления, которое позволит в будущем детально разобраться в определяющих последние механизмах, лишь начинается. Однако опыты по влиянию прибавленного в воду комплексона трилона-Б (этилендиаминтетраацетата или ЭДТА) на коэффициенты накопления различных элементов пресноводными организмами, дали уже теоретически, а может быть и практически, небезынтересные результаты, наглядно изображенные на рис. 5 (Тимофеева-Ресовская и Тимофеев-Ресовский, 1959; Тимофеев-Ресовский и Тимофеева-Ресовская, 1959). Эти опыты проводились с 10 радиоизотопами (серы, железа, кобальта, цинка, стронция, иттрия, ниобия, рутения, цезия и церия) на 4 видах различных водных растений (хара, ряска, роголистник и элодея) и малых ложноконских пиявках. Все эти опыты дали совершенно сходные, отли-

чающиеся лишь по абсолютным значениям, результаты, усредненные на рис. 5. На этом рисунке изображены (в логарифмическом масштабе) положительные (вверх от горизонтальной линии) или отрицательные (вниз) отклонения коэффициентов накопления при прибавлении в воду ЭДТА, в процентах от соответствующих значений этих коэффициентов в его отсутствии (контроль, принятый за 100% и изображенный горизонтальной линией). Из этого рисунка ясно видно, что все изученные элементы разбиваются на 4 группы: а) стронций и цезий, коэффициенты накопления которых в присутствии ЭДТА повышаются в 2—3 раза;

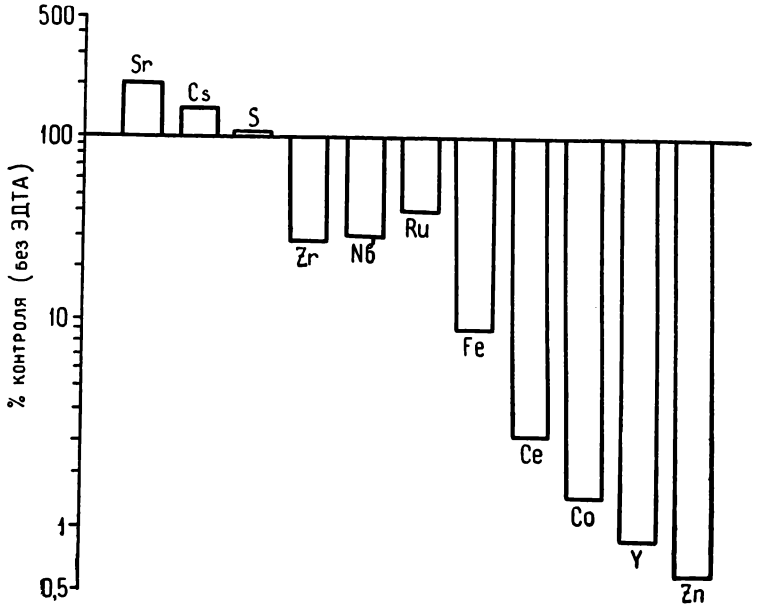

Рис. 5. Влияние комплексона ЭДТА на коэффициенты накопления. Усредненные данные — из опытов с элодеей, роголистником, ряской, харой и малой ложноконской пиявкой.

б) сера, не реагирующая на ЭДТА; в) цирконий, ниобий и рутений, коэффициенты накопления которых в присутствии ЭДТА снижаются в 1,5—2 раза, и г) железо, кобальт, цинк, иттрий и церий, коэффициенты накопления которых в присутствии ЭДТА снижаются в десятки и даже сотни раз. Теоретически эти результаты нетрудно интерпретировать. С элементами последней группы ЭДТА образует весьма устойчивые и легко воднорастворимые комплексные соединения; они в этой форме делаются весьма мобильными и не задерживаются, т. е. не накапливаются в организме, благодаря чему их коэффициент накопления в присутствии ЭДТА резко снижается. Сера, будучи и без того гидротропным элементом и не образуя устойчивых соединений с ЭДТА, никак не реагирует на присутствие последнего в воде. Остальные элементы образуют с ЭДТА соединения, значительно менее устойчивые, чем комплекс кальций — ЭДТА; поэтому ЭДТА переводит присутствующий в воде и живых организмах кальций в легко воднорастворимое мобильное комплексное соединение, а в результате вызванного этим нарушения нормального кальциевого обмена стронций и цезий накапливаются более, а цирконий, ниобий и рутений несколько менее энергично. Практически это мо-

жет иметь значение для ускорения дезактивации воды от радиоизотопов стронция и цезия путем прибавления в водоем трилона-Б (технический препарат ЭДТА, применяемый в водопроводном деле для «смягчения» воды).

§ 11. Таким образом, как распределительные опыты (§ 4, 5), так и опыты по изучению коэффициентов накопления различных радиоизотопов пресноводными организмами (§ 8, 9) приводят к заключению, что (как уже указывалось выше, в § 6) вода должна постепенно, в результате постоянно протекающих процессов накопления биомассой и грунтами, очищаться от попадающих в водоем радиоизотопов. Последние с течением времени захораниваются в образующихся донных отложениях.

IV. ДЕЗАКТИВАЦИЯ ВОДЫ В СЛАБОПРОТОЧНЫХ ВОДОЕМАХ

§ 12. На основании результатов изучения сорбции радиоизотопов грунтами и почвами (Титлянова и Тимофеева, ст. в настоящем сборнике), а также вышеприведенных опытов по распределению радиоизотопов по компонентам водоемов (§ 3, 6) и по их накоплению пресноводными организмами (§ 7—11), естественно возникает мысль о возможности биологической дезактивации радиоактивно загрязненных вод. Для проверки этого предположения нами проводился целый ряд опытов в полулабораторных сериях слабопроточных бачков и в слабопроточных небольших прудах.

§ 13. Опыты в сериях бачков проводились с радиоактивными изотопами серы, железа, кобальта, цинка, стронция, иттрия, циркония, ниобия, рутения, цезия и церия, а также с выдержанным неразделенным раствором осколков урана. Методика этих опытов очень проста. Серии из 5—10 бачков (емкостью в 45 или 90 литров) соединяются верхним стоком. Во все бачки помещается определенное количество грунта (озерный песок с прослойкой плодородной почвы), они засаживаются водными растениями (элодея, роголистник, уруть и т. д.), наливаются водой, в которую прибавляется некоторое количество озерного или прудового планктона, и пускаются различные водные беспозвоночные. «Заряженные» таким образом бачки оставляются в течение некоторого времени (пара недель) стоять для сформирования в них более или менее устойчивых биоценозов. Затем, в течение 1—6 месяцев через соответствующую серию ежедневно пропускается определенное количество (от 1/30 до 1/60 от общего количества воды в серии) слабой концентрации (от 1 до 25 *мккюри/л*) раствора того или иного радиоизотопа. Ежедневно (а к концу долгосрочных опытов реже) из всех бачков серии берутся пробы воды для измерения радиоактивности. После окончания опыта производится полный баланс радиоактивности во всех бачках серии: определяется количество воды, вес грунта, вес водных растений, вес перифитона, планктона и детрита, вес животных; и во всех этих компонентах определяется концентрация радиоактивности и вычисляется ее общее количество. Конечно, в течение всего опыта измеряется и количество вытекающей из последнего бачка воды и определяется концентрация в ней радиоактивности, если таковая обнаруживается (Агафонов, 1956, 1958; Агафонов, Долгих, Савченко и Тимофеев-Ресовский, 1961).

§ 14. Результаты всех проведенных до сих пор опытов в слабопроточных сериях бачков сводятся к следующему. Большинство радиоизотопов, если скорость протока не превышает 1/30 общего объема воды в серии бачков в сутки, в течение всего опыта (за время которого сменяется весь объем воды в серии, а иногда и несколько раз) не проходит

через серию, так что вытекающая из последнего бачка вода оказывается чистой. Это относится к железу, кобальту, цинку, иттрию, цирконию, ниобию, цезию и церию. При тех же условиях стронций и рутений проходят через серию в количестве нескольких процентов, а сера в еще большем количестве (11%). При изменении режима, сводящегося к еще большему замедлению протока (если суточный сброс не превышает 1/60 общего объема воды в серии) стронций и рутений также практически целиком задерживаются в серии бачков, не обнаруживаясь в вытекающей из последнего бачка воде. Концентрации радиоактивности в воде последовательных бачков серии из опытов с различными радиоизотопами изображены графически на рис. 6. Естественно, что концентрация радиоактивности в воде, а также в грунте и биомассе

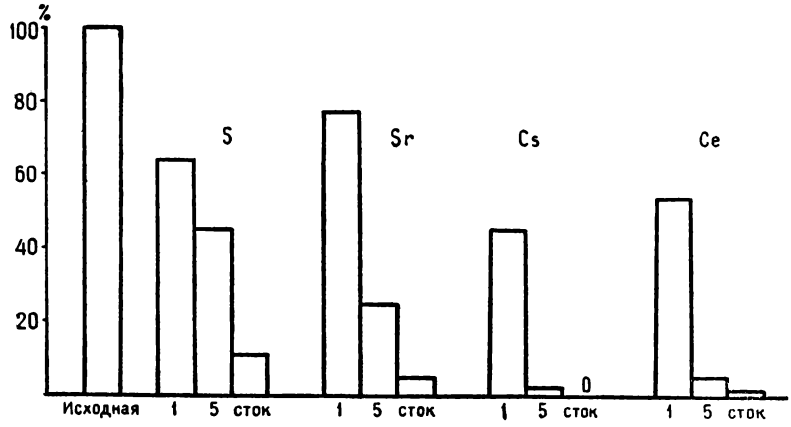

Рис. 6. Радиоактивность воды из первого и пятого бачков и стока из серии в опытах с серой, стронцием, цезием и церием в процентах от исходной радиоактивности раствора.

резко падает от первого к последующим бачкам серии. По типу распределения между компонентами последовательные бачки в опытах с растворами отдельных радиоизотопов (несмотря на резкую разницу в концентрациях между первым, средним и последним бачками серии) существенно не отличаются друг от друга и соответствуют тем типам распределения, которые для разных радиоизотопов были ранее уже описаны (§ 4). Соответственно все бачки серии в этих опытах принимают примерно одинаковое участие в очистке воды, выражающееся в том, что все задерживают приблизительно одинаковый процент от поступающей в каждый бачок радиоактивности. Несколько иначе обстоит дело со смесью осколков урана: здесь первый и отчасти второй бачок задерживают больший процент от поступающей в них активности, чем последующие. Это просто объясняется различной био- и педотропностью разных элементов, входящих в смесь, благодаря чему в первых бачках преимущественно задерживаются хорошо концентрируемые грунтом и биомассой элементы, а в последующие бачки поступает менее «благоприятная», с точки зрения очистки воды, смесь. Нечто сходное (несколько лучшая «работа» первых бачков) наблюдается и в опытах с рутением и церием, элементами всегда присутствующими в растворе в разных и в разной степени сорбируемых твердыми фазами формах. Опыты с неразделенным раствором осколков урана, несмотря на присутствие в них в известном проценте стронция и рутения, также дают,

даже в долгосрочных опытах, практически полную дезактивацию воды, проходящей через серию бачков. Несколько лучшие результаты получаются, если первый бачок серии (в который поступает наиболее высокая концентрация излучателей) вдвое больше остальных. Очистка воды много лучше в сериях из ряда отдельных связанных друг с другом верхним стоком бачков, чем в одном водоеме, по общему объему равном всей серии; это объясняется наличием в серии отдельных водоемов, чисто механических преград для быстрой диффузии и механического перемешивания взвесей между высоко активным местом втока и слабо активным местом стока.

§ 15. Так же, как и в отношении изучения коэффициентов накопления (§ 10), анализ влияния различных сопутствующих факторов на степень дезактивации воды в слабопроточных сериях водоемов только еще начинается. Известно, однако, уже, что наилучший эффект дезактивации достигается при pH воды (в пределах, наблюдаемых в природных условиях), оптимальном для населяющего водоем биоценоза; резкие отклонения в обе стороны несколько снижают эффект, в результате угнетения ведущих форм биоценоза. Прибавление во вток некоторых мутей (особенно прудового ила), или взмучивание их в первом водоеме, несколько повышает эффект дезактивации, благодаря сорбции части радиоактивности оседающей мелкодисперсной фазой (мутью). Из результатов изучения коэффициентов накопления разных радиоизотопов различными группами и видами пресноводных организмов с несомненностью следует, что в будущем представляется вполне возможным для каждой комбинации излучателей, попадающих в водоем, подбирать оптимальные водные биоценозы из видов, обладающих наиболее высокими коэффициентами накопления данных радиоизотопов.

§ 16. Результаты опытов по распределению различных радиоизотопов по основным компонентам водоема (§ 4), весьма высокие коэффициенты накопления большинства микроэлементов из водного раствора пресноводными организмами (§ 8) и, наконец, удовлетворительные результаты опытов с сериями слабопроточных бачков (§ 14) побудили поставить опыты в наружных установках, состоявших из небольших прудов-отстойников и почвенных фильтров (Тимофеева-Ресовская, 1956, 1957; Тимофеева-Ресовская и Тимофеев-Ресовский, 1959). Первые опыты этого рода проводились в течение трех лет на двух установках. Первая состояла из почвенного фильтра (на который ежесуточно поступало определенное количество неразделенного раствора осколков урана концентрацией 25 *мккюри/л* по бета-излучению) и пруда (в который поступал раствор, прошедший через почвенный фильтр), из которого вода стекала в особый приямок; вторая установка отличалась тем, что на первом месте стоял пруд, в который поступал раствор, стекавший из него на почвенный фильтр, а из последнего в приямок. Три года работы на этих установках показали, что обе работают вполне удовлетворительно, пропуская лишь около полупроцента поступающей в них радиоактивности. Выяснилось, что почвенные фильтры и пруды очищают воду примерно одинаково, причем несколько лучше (в смысле процента дезактивации) работает первый компонент (фильтр в первой и пруд во второй установке). Последнее обстоятельство объясняется так же, как и лучшая работа первого бачка в сериях, через которые пропускался неразделенный раствор осколков урана (§ 14). Исходя из полученных на этих установках результатов, дальнейшие опыты проводились в установке, представлявшей собой серию связанных верхним стоком трех небольших прудов; фильтры, чрезвычайно неудобные в обращении (требующие периодической смены и захоронения высоко-

активной отработавшей почвы), были исключены и заменены дополнительными прудиками. Эта третья установка работала совершенно безотказно и еще лучше первых, давая столь же высокую и весьма равномерную дезактивацию воды. Усредненные результаты дезактивации воды в серии из трех прудов графически изображены на рис. 7. Из этого рисунка видно, что из первого пруда вытекает 2,8% исходной активности, из второго 1,2%, а из третьего 0,7%. Так же, как и в сериях бачков, первый пруд работает лучше второго и третьего, забирая из смеси излучателей наиболее легко сорбирующиеся.

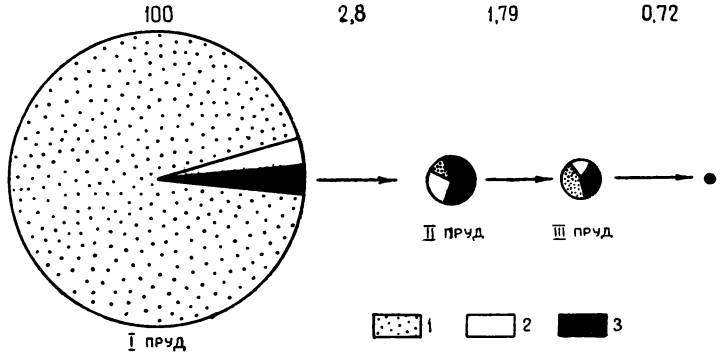

Рис. 7. Схематическое изображение баланса радиоактивности серии из трех прудов.

1 — содержание радиоактивности в грунте и биомассе пруда; *2* — содержание радиоактивности в воде пруда; *3* — содержание радиоактивности в стоке из пруда. Секторы соответствуют процентам от общей радиоактивности каждого данного пруда. Наверху приведена радиоактивность, выносимая из каждого пруда, в процентах от исходной (принятой за 100).

§ 17. Таким образом, опыты в сериях бачков и наружные опыты в небольших прудах показали, что радиоактивно-загрязненная вода, при благоприятном режиме достаточно медленного протока, хорошо очищается почти от всех отдельных радиоизотопов и от неразделенной смеси осколков урана. Этим создаются основы весьма простой, дешевой и удобной биологической дезактивации сточных и промышленных вод, загрязненных радиоактивными изотопами или микроколичествами других токсичных химических элементов и веществ (Тимофеев-Ресовский, Тимофеева-Ресовская и Агафонов, 1959). Биологический метод пригоден, конечно, лишь для очистки вод, содержащих относительно слабые концентрации излучателей; но его простота и относительная дешевизна в особенности резко возрастают с увеличением количества ежесуточного сброса. Особенное удобство этого метода заключается в одновременном захоронении излучателей или токсичных металлов в донных отложениях, делающем ненужной заботу об устранении высоко радиоактивных концентратов. Само собой разумеется, что наибольшей концентрации достигают, при этом, излучатели в донных отложениях первого водоема серии; но это не должно беспокоить, т. к. специальные расчеты показывают, что толща воды примерно в один метр отширмовывает практически все излучения донных отложений, а увеличение размеров водоема сверх диаметра примерно в три метра не увеличивает (благодаря самопоглощению) наружную дозу излучений (над водой и по берегам), испускаемую водоемом-отстойником (Горбатюк и Тимофеев-Ресовский, 1959).

V. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

§ 18. Из всех проведенных до сих пор разнообразных опытов, несмотря на то что работа с применением метода меченых атомов в гидробиологии начата 10 лет назад, намечаются уже определенные закономерности, характеризующие судьбу излучателей в водоемах. В различных опытах изучались радиоактивные изотопы 14 химических элементов; в их число входят практически наиболее важные, с точки зрения возможности загрязнения водоемов, излучатели, такие как стронций, иттрий, цирконий, ниобий, рутений, цезий и церий. На основании проведенных опытов, все изученные радиоизотопы (пока в основном эмпирически) разбиваются на 4 группы по типу распределения их между основными компонентами водоемов (вода, грунт и биомасса) гидротропные, равномерно распределяющиеся, педотропные и биотропные (§ 4). Эта же закономерность типов распределения в известной мере сказывается и на средних коэффициентах накопления радиоизотопов пресноводными организмами: гидротропные дают очень низкие, биотропные и большинство педотропных очень высокие, а остальные средние коэффициенты накопления (§ 8). Намечается и практическая возможность защиты открытых водоемов от радиоактивных загрязнений промышленными и сточными водами путем их биологической дезактивации в сериях водоемов-отстойников (§ 16, 17).

§ 19. Помимо всего вышеупомянутого необходимо рассмотреть еще один важный, особенно с точки зрения охраны природы, вопрос: о возможности угнетающих влияний ионизирующих излучений в загрязненных радиоизотопами водоемах на населяющие их живые организмы и на состав и динамику водных биоценозов. Из обширного опыта радиобиологии хорошо известно, что ионизирующие излучения при достаточно высоких дозах действуют угнетающе, а с дальнейшим повышением доз — летально на все живые организмы. При этом радиочувствительность различных групп и видов живых организмов может быть весьма различной, в общем повышаясь от низших к более высоко организованным формам. Кроме того, в целом ряде специальных опытов показано, что слабые дозы могут часто оказывать стимулирующее действие, повышая темпы прироста биомассы живых организмов (Тимофеев-Ресовский, Порядкова, Макаров и Преображенская, 1957; Порядкова, 1957; Тимофеев-Ресовский, 1957; Тимофеев-Ресовский и Лучник, 1958). В отношении радиочувствительности большинство пресноводных микроорганизмов, растений и беспозвоночных является весьма малочувствительными, вынося без заметного угнетения относительно высокие дозы ионизирующих излучений. Но, даже если практически возможная степень загрязнения природных вод радиоактивными изотопами (принимая во внимание и высокие коэффициенты накопления излучателей живыми организмами) и не вызывает резко угнетающего и летального эффекта у большинства пресноводных организмов, необходимо считаться с возможностью существенных перестроек биоценозов в радиоактивно загрязненных водоемах благодаря наличию больших разниц в степени радиоугнетения и радиостимуляции разных видов. С целью проверки этой возможности были проведены специальные опыты по качественному и количественному анализу очень удобного для этих целей сообщества пресноводного перифитона (обрастания бактериями, водорослями и инфузориями подводных поверхностей). Прирост общей биомассы перифитона и изменения видового состава количественно ведущих форм сообщества изучались в контрольных сосудах и в присутствии в воде излучателей в разных концентрациях (Тимофеев-Ресов-

ский, Порядкова, Сокурова и Тимофеева-Ресовская, 1958; Тимофеева-Ресовская, 1959). Результаты этих опытов показали, что присутствие излучателей в широких пределах относительно слабых концентраций (от нескольких единиц до нескольких сот *мккюри/л*) вызывает весьма заметную стимуляцию прироста общей биомассы перифитона; угнете-

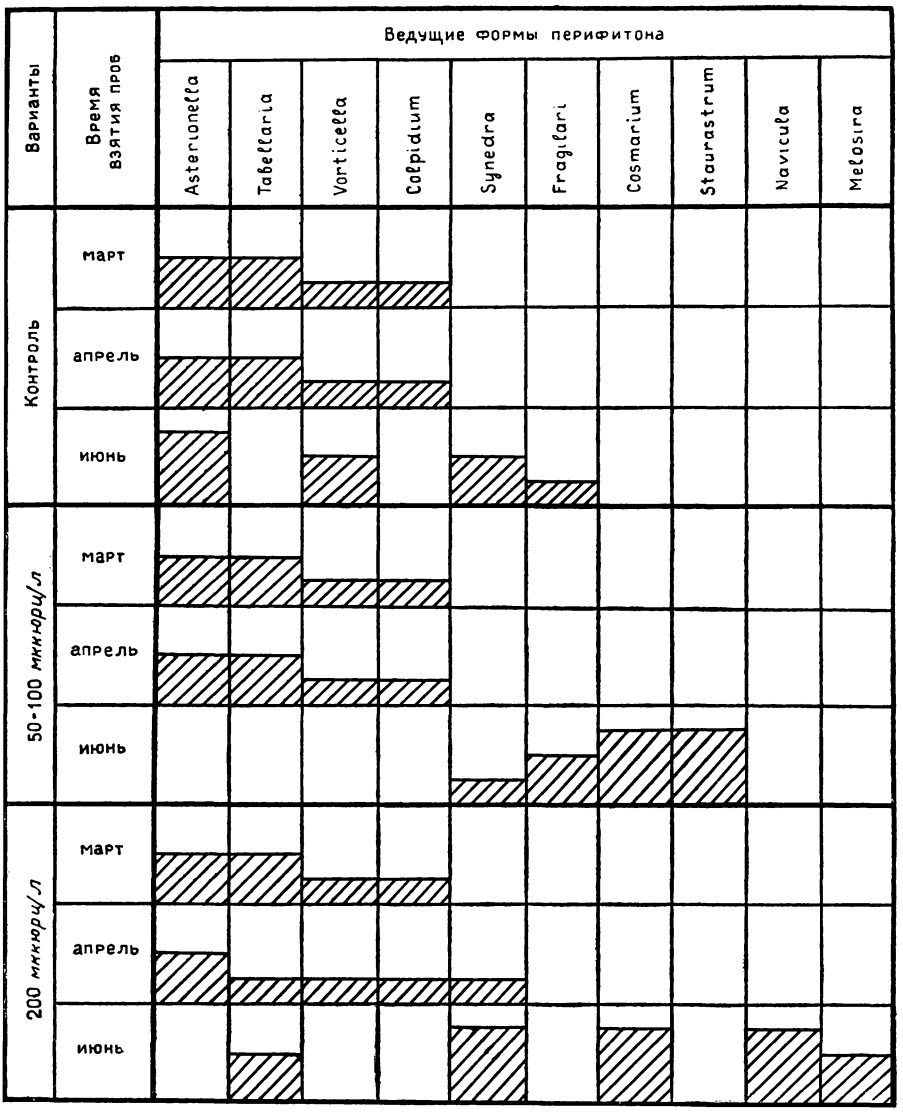

Рис. 8. Смена ведущих форм в биоценозе перифитона под влиянием радиоактивности. Высота столбиков выражает встречаемость соответствующих форм через 2, 3 и 5 мес. после начала опыта.

ние прироста биомассы не было обнаружено даже при концентрации 600 *мккюри/л* (при этом все еще наблюдалась стимуляция), которая далеко превышает возможные концентрации в загрязненных водоемах. Но, как показано на рис. 8, в присутствии излучателей происходило возрастающее с концентрацией радиоизотопов изменение в составе

количественно ведущих форм в сообществе, по сравнению с контролем. Из этого следует, что даже такие концентрации излучателей в воде (а следовательно и дозы облучения), которые не только не угнетают, а даже еще стимулируют общий прирост биомассы, могут существенно влиять на качественный, видовой состав водных биоценозов. При общей тенденции повышения радиочувствительности от низших к высшим формам, можно при таких перестройках биоценозов ожидать понижения их качественного состава и обеднения высшими формами.

§ 20. Водоемы являются во многих отношениях весьма удобными для точных исследований биогеоценозами. Особенно легко и просто при их изучении применять метод меченых атомов. Это позволяет надеяться на то что уже в ближайшее время работы в области радиационной гидрологии и гидробиологии дадут интересный и важный материал для понимания конкретных механизмов целого ряда протекающих в ограниченных участках биосферы биогеохимических и биогеоценологических процессов. Прежде всего при этом подлежит точному изучению протекание неполных круговоротов в отношении распределения в водоеме различных групп радиоактивных изотопов (§ 6), ведущее к обогащению рассеянными элементами донных отложений и формирующихся из них терригенных осадочных пород. Но уже сейчас на основании результатов всех проведенных опытов можно делать, с достаточным приближением, практические прогнозы о характере возможных загрязнений водоемов различными излучателями и их последствиях; и, что особенно важно, можно наметить пути защиты открытых водоемов от интоксикации излучателями и повышенными концентрациями ядовитых микроэлементов с помощью биологической очистки загрязненных излучателями и металлами промышленных и сточных вод. В заключение необходимо, однако, подчеркнуть весьма еще слабое развитие и распространение работ по радиационной гидробиологии и применению метода меченых атомов в разнообразных гидрологических, гидрохимических и гидробиологических исследованиях.

ЛИТЕРАТУРА

Агафонов Б. М. 1956. Некоторые опыты по дезактивации воды. Тезисы Всес. конф. мед. радиол., Медгиз.

Агафонов Б. М. 1958. Лабораторные опыты по биологической дезактивации воды в сериях водоемов-бачков. Бюлл. Урал. отд. МОИП, вып. 1.

Агафонов Б. М., Долгих Т. И., Савченко М. И. и Тимофеев-Ресовский Н. В. 1960. Распределение рассеянных элементов по компонентам водоема. IV. Опыты в сериях слабопроточных бачков. Сб. раб. Лаб. биофизики УФАН СССР, II, Изд-во АН СССР.

Бруновский Б. К. и Кунашева К. Г. 1935. Некоторые данные относительно содержания радия в растениях и водах. Тр. Биогеохим. лаб. АН СССР, М., Изд-во АН СССР, т. 3.

Вернадский В. И. 1926. Биосфера. М., ГИХИ.

Вернадский В. И. 1929. О концентрации радия живыми организмами. ДАН СССР, сер. А, № 2.

Вернадский В. И. 1940. Биогеохимические очерки. М., Изд-во АН СССР.

Вернадский В. И. и Виноградов А. П. 1931. О химическом элементарном составе рясок, как видовом признаке. ДАН СССР, сер. А, № 6.

Виноградов А. П. 1935—1944. Химический элементарный состав организмов моря. Ч. I—III. Тр. Биогеохим. лаб. АН СССР, Изд-во АН СССР, т. 3, 4 и 6.

Виноградов А. П. 1944. Геохимия рассеянных элементов в морской воде. Успехи химии, 13.

Гецова А. Б. и Волкова Г. А. О накоплении пресноводными организмами химических элементов из водных растворов. V. О концентрации и коэффициентах накопления десяти различных радиоизотопов пресноводным моллюском *Aplexa hypnorum* L. Бюлл. МОИП, сер. биол., 64 (в печати).

Гецова А. Б., Ляпунова Н. А., Поликарпов Г. Г. и Тимофеева-Ресовская Е. А. О накоплении пресноводными организмами химических элементов из водных растворов. VI. О накоплении и распределении по органам радиоактивных изотопов восьми различных элементов беззубкой *Anadonta cellensis* Schröt. Бюлл. МОИП, сер. биол., 64 (в печати).

Горбатюк Н. В. и Тимофеев А. Н. 1960. Распределение рассеянных элементов по компонентам водоемов. III. Стабилизация активности свежего раствора осколков урана при равномерном его поступлении в водоем и дозы излучения внутри и вне водоема. Сб. раб. лаб. биофизики УФАН СССР, II, Изд-во АН СССР.

Жарова Т. О накоплении пресноводными организмами химических элементов из водных растворов. VII. О коэффициентах накопления радиоактивных изотопов стронция, рутения, цезия и церия пресноводными бактериями. Бюлл. МОИП, сер. биол., 64 (в печати).

Зенкевич Л. А. 1947—1951. Фауна и биологическая продуктивность моря. М., Изд-во Советская наука, т. I, II.

Зернов С. А. 1949. Общая гидробиология. М.—Л., Изд-во АН СССР.

Куликов Н. В. 1957. Работы по экспериментальной биогеоценологии. II. Влияние замачивания семян в смеси бета-излучателей на биомассу и структуру экспериментального фитоценоза. Сб. раб. лаб. биофизики УФАН СССР, I, Свердловск, Тр. Ин-та биологии, вып. 9.

Порядкова Н. А. 1956. Методика и результаты некоторых опытов по радиостимуляции растений. Биофизика, т. 1.

Семенов Д. И. 1957. Влияние комплексонов на поведение металлов и излучателей в организме. I. Механизм действия комплексонов. Сб. раб. лаб. биофизики УФАН СССР, I, Свердловск, Тр. Ин-та биологии, вып. 9.

Сукачев В. Н. 1945. Биогеоценология и фитоценология. ДАН СССР, 47.

Сукачев В. Н. 1947. Основы теории биогеоценологии. Юбил. сб. 30-летия Великой Октябрьской революции, М., Изд-во АН СССР, т. 2.

Сукачев В. Н. 1948. Фитоценология, биогеоценология и география. Тр. II Всес. Географ. съезда, М., Географгиз, т. I.

Сукачев В. Н. 1949. О соотношении понятий географический ландшафт и биогеоценоз. Вопр. геогр., вып. 16.

Сукачев В. Н. 1950. Предварительные программы стационарных комплексных биогеоценологических исследований. Землеведение, нов. сер., т. 3.

Тимофеев-Ресовский Н. В. 1956. Биофизическая интерпретация явлений радиостимуляции растений. Биофизика, т. 1.

Тимофеев-Ресовский Н. В. 1957. Применение излучений и излучателей в экспериментальной биогеоценологии. Бот. журн., 42.

Тимофеев-Ресовский Н. В. 1960. Распределение рассеянных элементов по компонентам водоема. I. Некоторые общие соображения. Сб. раб. лаб. биофизики УФАН СССР, II, Изд-во АН СССР.

Тимофеев-Ресовский Н. В. и Лучник Н. В. 1959. Радиационная стимуляция растений и ее возможная теоретическая интерпретация. Тр. Всес. конф. примен. изотоп. и излуч., Радиобиология, Изд-во АН СССР.

Тимофеев-Ресовский Н. В., Порядкова Н. А., Макаров Н. М. и Преображенская Е. И. 1957. К проблеме радиостимуляции растений. I. О действии слабых доз ионизирующих излучений на рост и развитие растений. Сб. раб. лаб. биофизики УФАН СССР, I, Свердловск, Тр. Ин-та биологии, вып. 9.

Тимофеев-Ресовский Н. В., Порядкова Н. А., Сокурова Е. Н. и Тимофеева-Ресовская Е. А. 1957. Работы по экспериментальной биогеоценологии. I. Влияние излучателей на биомассу и структуру наземных, почвенных и пресноводных биоценозов. Сб. раб. лаб. биофизики УФАН СССР, I, Свердловск, Тр. Ин-та биологии, вып. 9.

Тимофеева-Ресовская Е. А., Тимофеев-Ресовский Н. В. 1960. О влиянии этилендиаминтетраацетата (ЭДТА) на коэффициенты накопления различных радиоизотопов из водного раствора пресноводными растениями. ДАН СССР, т. 130, № 1.

Тимофеева-Ресовская Е. А., 1956. Некоторые опыты по дезактивации воды. Всес. конф. мед. радиол., М., Медгиз.

Тимофеева-Ресовская Е. А. 1957. Почвенно-биологическая дезактивация воды в прудах-отстойниках. Бюлл. МОИП, сер. биол., 62.

Тимофеева-Ресовская Е. А. 1958. О скорости подводного обрастания (образования перифитона) в присутствии слабых концентраций излучателей. Бюлл. Урал. отд. МОИП, вып. 1.

Тимофеева-Ресовская Е. А., Агафонов Б. М. и Тимофеев-Ресовский Н. В. 1960. О почвенно-биологической дезактивации воды. Сб. раб. лаб. биофизики УФАН СССР, III, Свердловск, Тр. Ин-та биологии, вып. 13.

Тимофеева-Ресовская Е. А., Попова Э. И., Поликарпов Г. Г. 1958.

О накоплении пресноводными организмами химических элементов из водных растворов. I. Концентрация радиоактивных изотопов фосфора, цинка, стронция, рутения, цезия и церия разными видами пресноводных моллюсков. Бюлл. МОИП, сер. биол., 63.

Тимофеева-Ресовская Е. А., Тимофеева Н. А. и Тимофеев-Ресовский Н. В. 1959. О накоплении химических элементов из водных растворов. III. О коэффициентах накопления различных радиоизотопов тремя видами водных растений. Бюлл. МОИП, сер. биол., 64.

Тимофеева-Ресовская Е. А. и Тимофеев-Ресовский Н. В. 1958. О накоплении химических элементов из водных растворов. II. О коэффициентах накопления различных радиоизотопов прудовиком. Бюлл. МОИП, сер. биол., 63.

Тимофеева-Ресовская Е. А. и Тимофеев-Ресовский Н. В. 1960. Распределение рассеянных элементов по компонентам водоема. II. Почвенно-биологическая дезактивация воды в прудах-отстойниках. Сб. раб. лаб. биофизики УФАН СССР, II, Изд-во АН СССР.

ЗАМЕЧЕННЫЕ ОПЕЧАТКИ

Стр.	Строка	Напечатано	Следует читать
32	16-я снизу	радиоактивных-загрязненных	радиоактивно загрязненных
42	12-я сверху	радиоактивности кобальта	радиоактивного кобальта
54	10-я снизу	(например, бактерии *Lemna* и *Radix ovata*...	(например, бактерии, *Lemna* и *Radix ovata*...