Уральский филиал АН СССР	Пермское правление НТОЭП	Пермский Государственный университет

При участии Совета по проблемам водного хозяйства АН СССР
СОВЕЩАНИЕ ПО ВОПРОСАМ ЭКСПЛУАТАЦИИ КАМСКОГО ВОДОХРАНИЛИЩА
г. Пермь **1959 г.**

Н. В. ТИМОФЕЕВ-РЕСОВСКИЙ и
Е. А. ТИМОФЕЕВА-РЕСОВСКАЯ
Лаборатория биофизики УФАН СССР

РАСПРЕДЕЛЕНИЕ ИЗЛУЧАТЕЛЕЙ В ВОДОЕМАХ

§ 1. Водоемы, наряду с почвами и населяющими их фитоценозами, представляют наибольший интерес в отношении судьбы излучателей, попадающих в природные биогеоценозы (Сукачев, 1946—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 интоксикациями, а с другой стороны, одними из наиболее ценных и в первую очередь подлежащих охране объектов.

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

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, растениями и планктоном, слабопроточные или не проточные более крупные баки, небольшие экспериментальные пруды) однократно или повторно вносится в воду тот или иной изотоп в слабой концентрации (0,1—25 микрокюри на 1 литр воды). Как при однократном, так и при повторном внесении или пропускании радиоактивного раствора через слабопроточные водоемы, через определенное время устанавливается некоторое статистическое 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 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 изотопа) 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 содежания 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, иода, 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 представи-

телем первой группы является сера; к ней же относятся, в доси пор изученных химических формах, германий и иод. Вторая группа 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 представлена цезием и к ней же относятся цинк и, отчасти, железо и кобальт; в воде остается очень мало, основная же масса этих элементов концентрируется в грунте. Наконец, типичными представителями четвертой группы являются церий, а также фосфор, иттрий, цирконий и ниобий; эти элементы в особенно большом количестве концентри-

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	48,0	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	11,0	49,0	37,0
Цирконий—95	13,0	43,0	44,0
Ниобий—95	20,1	44,3	35,6
Рутений—106	26,3	44,3	29,4
И о д—131	89,7	4,6	5,7
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

руются в биомассе. В табл. 1 приведено процентное распределение 14 различных радиоизотопов между водой, грунтом и биомассой водоемов. В таблице, наряду с процентами радиоактивности, содержащейся в воде, грунте и биомассе, приведен и вес 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 специальных опытов по определению коэффициентов накопления различных радиоактивных изотопов разными группами и видами пресноводных организмов, результаты которых описаны ниже, в следующем разделе.

§ 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 их динамикой. 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, 1957). Высокие коэффициенты накопления в биомассе объясняются «ассиметричным 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 распре-

деление 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. Пока же и 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 водных 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 радиактивности 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 по типу распределения.

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 тому 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 определения 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 установить 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 «ассиметричному обмену») может поддерживаться разница в концентрациях данных микроэлементов в организме и окружающей воде. Определяются коэффициенты накопления весьма просто: либо однократным прибавлением в воду аквариума (содержащего соответствующие виды организмов) данного радиоизотопа, либо поддержанием (путем повторного прибавления) в воде определенной низкой концентрации радиоизотопа с последующими измерениями концентраций в воде и в живых организмах до установления некоторого динамического равновесия между этими концентрациями, когда отношение этих концентраций и дает коэффициент накопления.

§ 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, 1959; Гецова и Волкова, 1959; Жарова, 1959; Субботина и Тимофеев-Ресовский, 1959). Для целого ряда видов определены коэффициенты накопления лишь немногих отдельных радиоизотопов, а для германия и иода определены коэффициенты накопления лишь несколькими отдельными видами пресноводных организмов. Результаты более обширных систематических и повторных опытов с радиоизотопами 12 различных химических элементов (фосфора, серы, железа, ко-

Таблица 2

Средние коэффициенты накопления различных радиоизотопов разными пресноводными организмами

ОРГАНИЗМЫ	Фосфор 32	Сера 35	Железо 59	Кобальт 60	Цинк 65	Стронций 90	Иттрий 91	Цирконий 95	Ниобий 95	Рутений 106	Цезий 137	Церий 144
Бактерии	—	—	—	—	—	785	—	—	—	445	180	32865
Суснедесмус	—	—	—	—	—	130	—	—	—	3550	265	22000
Сцигеоклониум	—	—	—	—	—	1910	94000	—	—	2450	1180	35100
Ривулярия	—	—	—	—	—	125	—	—	—	—	124	—
Хара	—	100	15500	7440	3530	260	6125	22300	3875	3610	340	26925
Диаптомус	27	27	1140	1800	—	90	—	1660	—	1670	1270	6960
Хидорус	—	—	—	—	—	370	—	—	—	2250	1020	—
Мезоциклопс	—	—	—	—	—	170	—	—	—	710	535	—
Ряска	—	220	9050	3900	12400	225	3925	10400	3295	4135	535	22000
Роголистник	—	65	8150	4280	2490	835	970	4750	2480	4115	150	16850
Элодия	—	35	8200	2550	1380	460	1850	2950	2960	870	90	3435
Прудовик	2550	—	85	450	270	3085	—	270	410	110	50	350
Аплекса	18790	33	1500	2090	118	485	—	360	—	370	340	5390
Беззубка	165	—	—	1090	—	85	—	455	275	170	90	370
Битиниа	3180	—	—	—	—	120	—	—	—	240	1360	3300
Радикс аурикулярия	1740	—	—	—	—	60	—	—	—	100	550	1050
Радикс овата	9400	—	—	—	—	320	—	—	—	295	390	7130
Пиявки	—	4	330	277	123	8	143	92	480	29	10	124
Личинки стрекоз	—	—	—	—	—	7	—	—	—	91	82	3240
Ручейники	—	5	1170	9550	—	223	—	960	—	980	165	1220

бальта, цинка, стронция, иттрия, циркония, ниобия, рутения, цезия и церия) на 9 видах пресноводных растений и 11 видах пресноводных беспозвоночных приведены в табл 2. Из этой таблицы 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 друг от друга, вариируя, например, для серы от единиц до пары 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

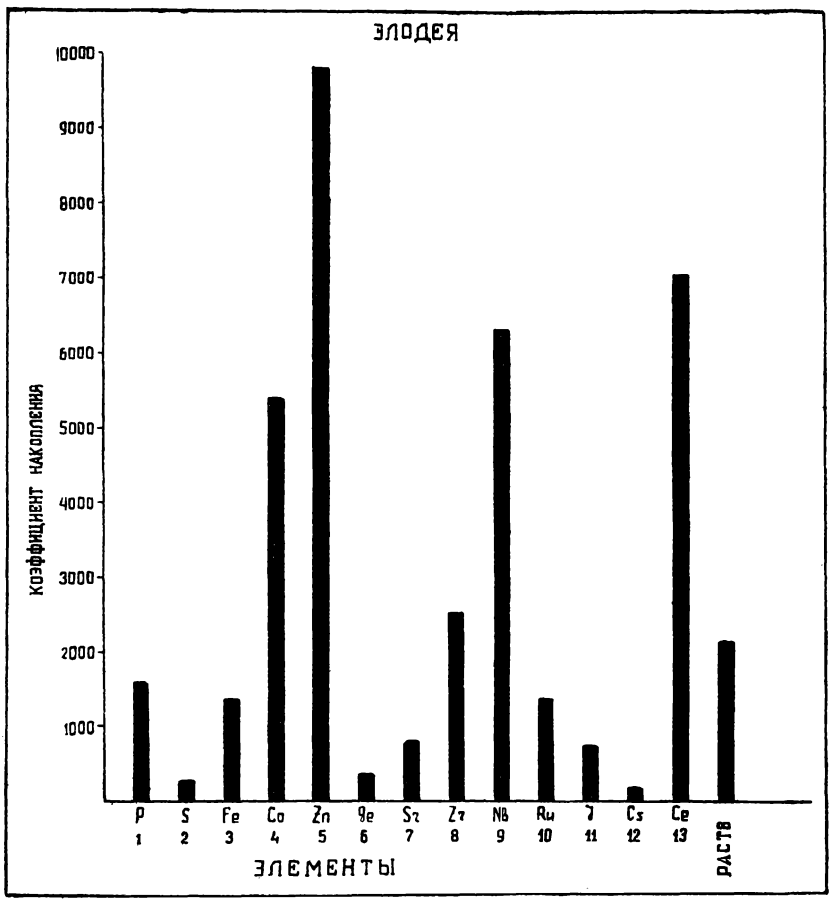

Рис. 1. Коэффициенты накопления различных радиоизотопов пресноводным растением Elodea canadensis

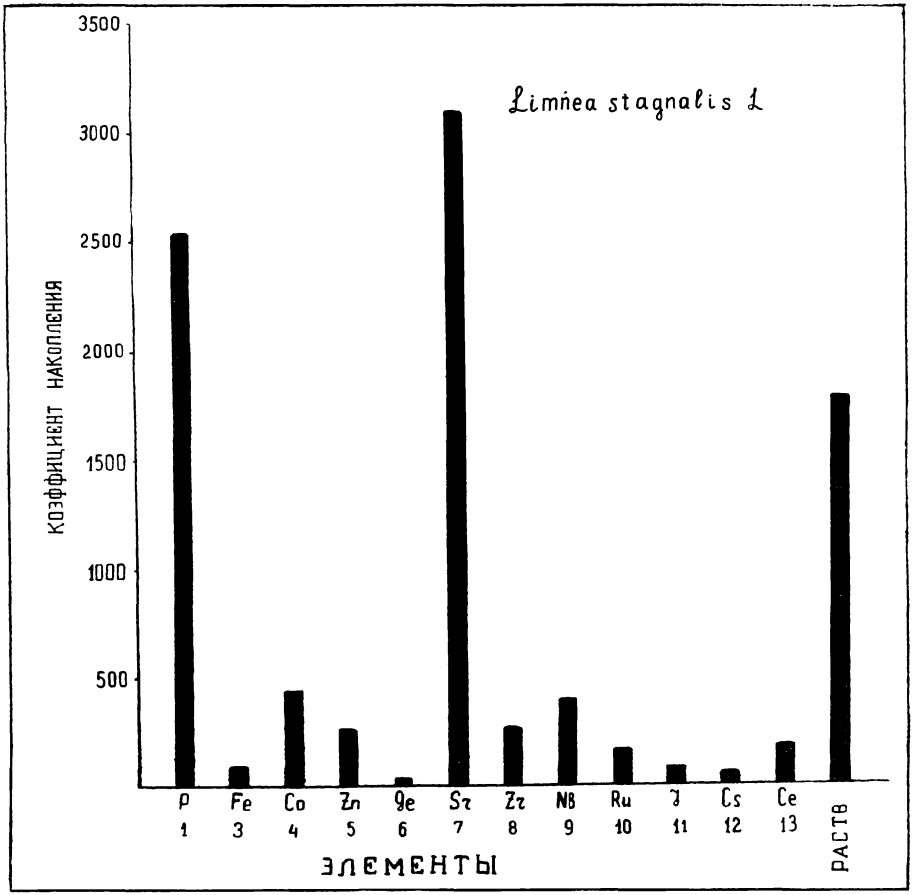

Рис. 2. Коэффициенты накопления различных радиоизотопов прудовиком Limnaed stagnalis

особенности, цезий — еще более низкие коэффициенты накопления) и в) в среднем по коэффициентам накопления разные виды и группа 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, ряска и радикс овата по церию, хара по цирконию, аплекса по фосфору, сцигеоклониум битиниа, диаптомус и хидорус по цезию, сцигеоклониум и прудовик по стронцию). На рис. 1 и 2 наглядно, в виде колонок, изображены различия по коэффициентам накопления между разными радиоизотопами у элодеи (рис. 1) и у прудовика (рис. 2).

§ 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 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). Нахождение 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 воды 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 прибавления в воду комплексона трилона—Б (этилендиаминтетраацетата или ЭДТА) на коэффициенты накопления различных элементов пресноводными организмами, дали уже теоретически, а может быть и практически небезинтересные результаты, наглядно изображенные на рис. 3 (Тимофеева-Ресовская и Тимофеев-Ресовский, 1959; Тимофеев-Ресовский и Тимофеева-Ресовская, 1959). Эти опыты проводились с 11 радиоизотопами (серы, железа, кобальта, цинка, стронция, иттрия, ниобия, циркония, рутения, цезия и церия) на 4 видах различных водных растений (хара, ряска, роголистник и элодея) и малых лжеконских пиявках. Все эти опыты дали совершенно сходные, отличающиеся лишь по абсолютным значениям, результаты, усредненные на рис. 3. На этом рисунке изображены (в логарифмическом масштабе) положительные (в верх от горизонтальной линии) или отрицательные (вниз) отклонения коэффициентов накопления при прибавлении трилона-Б, в процентах от соответствующих значений этих коэффициентов в отсутствии ЭДТА (контроль, принятый

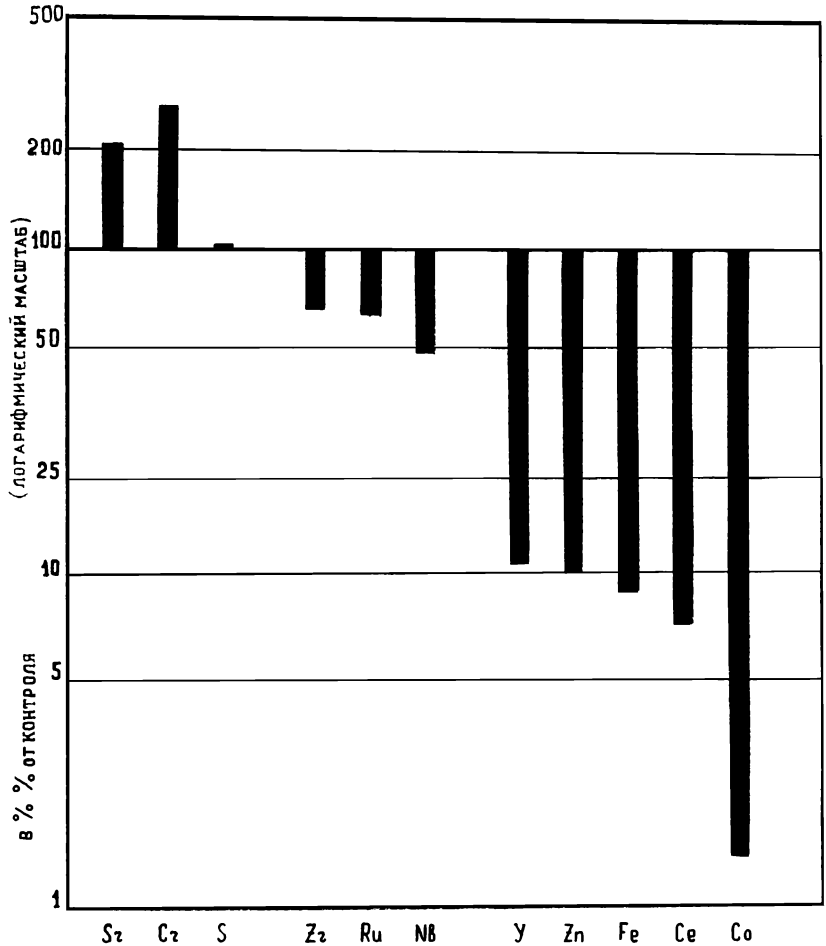

Рис. 3. Положительные и отрицательные отклонения коэффициентов накопления (в процентах от контрольных) при добавлении в воду комплексона ЭДТА. Усредненные данные из опытов с элодеей, роголистником, ряской, харой и малой ложноконской пиявкой; проценты изображены в логарифмическом масштабе.

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; 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 и мобильное комплексное соединение, а в результате вызванного этим нарушением нормального кальциевого обмена стронций и цезий накапливаются более, а цирконий, ниобий и рутений несколько менее энергично. Практически это может 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 (§§ 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 захороняются в образующихся донных отложениях.

Дезактивация воды в слабопроточных водоемах

§ 12. На основании результатов изучения сорбции радиоизотопов грунтами и почвами (Титлянова и Тимофеева, 1959, в печати), 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 вы-

держанным 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 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 микрокюри на литр) раствора того или иного радиоизотопа. Ежеденевно (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, 1959).

§ 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 в сутки, в течение всего опыта (за время которого сменяется весь объем воды в серии, иногда 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 двух 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. Естественно, что концентрация радиоактивности в воде, а также в грунте и биомассе резко падет 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 задерживает 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 высокоактивным местом втока и слабоактивным 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, 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 микрокюри на 1 литр 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, представляющей собой серию связанных верхним стоком трех небольших прудов; фильтры, чрезвычайно неудобные в обращении (требующие периодической смены и захоронения высокоактивной отработавшей почвы), были исключены и заменены дополнительными прудиками. Эта третья установка работала совершенно безотказно и еще лучше первых, давая столь же высокую и весь-

ма равномерную дезактивацию воды. Усредненные результаты дезактивации воды в серии из трех прудов графически изобра-

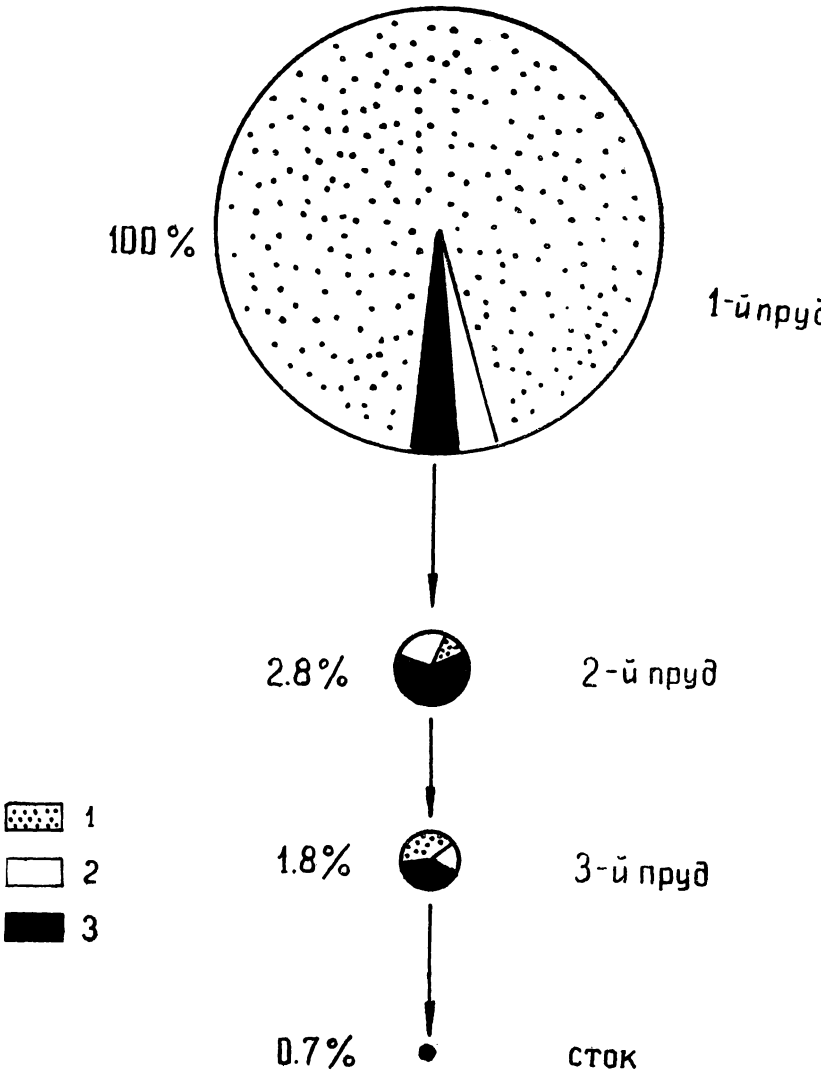

Рис. 4. Схематическое изображение баланса радиоактивности серии из трех прудов. 1—содержание радиоактивости в грунте и биомассе пруда, 2—содержание радиоактивности в воде пруда, 3—содержание радиоактивности в стоке из пруда. Секторы соответствуют процентам от общей радиоактивности каждого данного пруда. Наверху приведена радиоактивность в процентах от исходной (принятой за 100%), вытекающая из каждого пруда.

жены на рис. 4. Из этого рисунка видно, что из 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.

§ 17. Таким образом, полулабораторные опыты в сериях бачков и наружные опыты в небольших прудах показали, что радиоактивно загрязненная вода, при благоприятном режиме достаточно медленного потока, хорошо очищается от почти всех отдельных радиоизотопов и от неразделенной смеси осколков урана. Этим создаются основы весьма простой, дешевой и удобной биолигической дезактивации сточных и промышленных вод, загрязненных радиоактивными изотопами или микроколичествами 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, 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, делающей 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) и спускаемую водоемом отстойником (Горбатюк и Тимофеев-Ресовский, 1959).

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

§ 18. Из всех проведенных до сих пор разнообразных опытов, несмотря на то, что работа с применением метода меченых атомов в гидробиологии начата менее 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 радиоизо-

топы (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 живые организмы их населяющие 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, детально, на все живые организмы. При этом радиочувствительность различных видов и групп организмов может быть весьма различной, в общем повышаясь от низших к более высокоорганизованным 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 и Лучник, 1958). В отношении радиочувствительности большинство пресноводных микроорганизмов, растений и беспозвоночных является относительно весьма мало чувствительными, вынося без заметного угнететения 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 бак-

териями, 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 концетрациях (Тимофеев-Ресовский, Порядкова, Сокурова и Тимофеева-Ресовская, 1958; Тимофеева-Ресовская, 1959). Результаты этих опытов показали, что присутствие излучателей в широких пределах относительно слабых концентраций (от нескольких до нескольких сот микрокюри на 1 литр) вызывает весьма заметную стимуляцию прироста общей биомассы перифитона; угнетение прироста биомассы не было обнаружено даже при концентрации 600 микрокюри на литр (при которой все еще наблюдалась стимуляция, которая далеко провышает возможные концентрации в загрязненных водоемах. Но, как показано на рис. 5, 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 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 подлежат 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 последствиями; и, что особенно важно, можно наметить пути защиты открытых водоемов от интоксикации излучателями и повышенными концентрациями ядовитых микроэлементов с по-

мощью биологической очистки загрязненных излучателями и металлами промышленных и сточных вод. В заключение необходимо, однако, подчеркнуть весьма слабое развитие и распространение работ по радиационной гидробиологии и применения 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, 1. **Агафонов Б. М., Т, И, Долгих, М, И, Савченко и Н. В. Тимофеев-Ресовский, 1959.** «Распределение рассеянных элементов по компонентам водоема. IV. Опыты в сериях слабопроточных бачков». Сб. раб. лаб. биофизики, УФАН, 2 (в печати). **Бруновский Б. К. и Кунашева К. Г., 1935.** «Некоторые данные относительно содержания радия в растениях и водах». Тр. Биогеохим. лаб. АН СССР, 3. **Вернадский В. И., 1926.** «Биосфера». ГИХИ, Л. **Вернадский В. И., 1929:** «О концентрации радия живыми организмами». ДАН СССР, сер. А, 2. **Вернадский В. И., 1940.** «Биогеохимические очерки». Изд. АН СССР, М. **Вернадский В. И. и А. П. Виноградов, 1931.** «О химическом элементарном составе рясок, как видовом признаке». ДАН СССР, сер. А, 6. **Виноградов А. П., 1935—44.** «Химический элементарный состав организмов моря. I—III.» Тр. Биогеохим. Лаб. АН СССР, 3, 4 и 6. **Виноградов А. П., 1944.** «Геохимия рассеянных элементов в морской воде». Успехи химии, 13. **Гецова А. Б. и Волкова Г. А., 1959.** «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).

Горбатюк И. В. и Тимофеев А. Н., 1959 «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, 2, Свердловск. **Жарова Т., 1959.** «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). **Зенкович Л. А., 1947—51.** «Фауна и биологическая продуктивность моря». 1—2, Изд. «Совнаука». **Зернов С. А., 1949:** «Общая гидробиология»: Изд. АН СССР, М-Л.**Куликов Н. В., 1957.** «Работы по экспериментальной биогеоценологии. II. Влияние замачивания семян в смеси бета-излучателей на биомассу и структуру экспериментального биогеоценоза». Сб. раб. Лаб. биофизики, УФАН, 1, Свердловск. **Порядкова Н. А., 1956.** «Методика и результаты некоторых опытов по радиостимуляции растений». Биофизика, т. 1 **Семенов Д. И., 1957.** «Влияние комплексонов на проведение металлов и излучателей в организме. I. Механизм действия комплексонов». Сб. раб. Лаб. биофизики, УФАН, 1, Свердловск. **Сукачев В. Н., 1945.** «Биогеоценология и фитоценология». ДАН СССР, 47. **Сукачев В. Н., 1947.** «Основы теории биогеоценологии». Юбил. сб .АН СССР, 2, М. **Сукачев В. Н., 1948.** «Фитоценология, биогеоценология и география». Тр. II Всес. Геогр. съезда, 1. **Сукачев В. Н., 1949.** «О соотношении понятий географический ландшафт и биогеоценология». Вопр. геогр., 16.**Сукачев В. Н., 1950.** «Предварительные программы биогеоценологических исследований». Землеведение, н. с., 3. **Тимофеев-Ресовский Н. В., 1956.** «Биофизическая интерпретация явлений радиостимуляции растений». Биофизика, т. 1. **Тимофе-**

ев.-Ресовский Н. В., 1957. «Применение излучений и излучателей в экспериментальной биогеоценологии». Бот. журн., 42. **Тимофеев-Ресовский Н. В., 1959.** «Распределение рассеянных элементов по компонентам водоема. I. Некоторые общие соображения». Сб. раб. Лабор. биофизики, УФАН, 2, Свердловск. **Тимофеев-Ресовский и Н. В. Лучник, 1958.** «Радиационная стимуляция растений и ее возможная теоретическая интерпретация». Тр. Всес. конф. примен. изотоп. излуч. Радиобиология, изд: АН СССР. **Тимофеев-Ресовский Н. В., Н. А. Порядкова, Н. М. Макаров и Е. И. Преображенская, 1957.** «К проблеме радиостимуляции растений. I. О действии слабых доз ионизирующих излучений на рост и развитие растений». Сб. раб. Лаб. биофизики, УФАН, 1, Свердловск. **Тимофеев-Ресовский Н. В, Н. А. Порядкова, Е. Н. Сокурова и Е. А. Тимофеева-Ресовская 1957.** «Работы по экспериментальной биогеоценологии I. Влияние излучателей на биомассу и структуру наземных, почвенных и пресноводных биоценозов». Сб. раб. Лаб. биофизики, УФАН, 1, Свердловск. **Тимофеева-Ресовская Е. А. и Н. В. Тимофеев-Ресовский, 1959.** «О влиянии этилендиаминтетраацетата (ЭФТА) на коэффициенты накопления различных радиоизотопов из водного раствора пресноводными растениями» (в печати). **Тимофеева-Ресовская Е. А., 1956.** «Некоторые опыты по дезактивации воды». Всес. конф. мед. радиол. Медгиз. М, **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, 1. **Тимофеева-Ресовская Е. А., Б. М. Агафонов и Н. В. Тимофеев-Ресовский, 1959.** «О почвенно-биологической дезактивации воды». Юбил. сб. УФАН, Свердловск (в печати). **Тимофеева-Ресовская Е. А., Э. И. Попова, Г. Г. Поликарпов, 1958.** «О накоплении пресноводными организмами химических элементов из водных растворов. I. Концентрация радиоактивных изототопов фосфора, цинка, стронция, рутения, цезия и церия разными видами пресноводных моллюсков». Бюлл МОИП, сер. биол., 63. **Тимофеева-Ресовская Е. А., Н. А. Тимофеева и Н. В. Тимофеев-Ресовский, 1958.** «О накоплении химических элементов из водных растворов. III. О коэффициентах накопления различных радиоизотопов тремя видами водных растений». Бюлл. МОИП, сер. биол., 63. **Тимофеева-Ресовская Е. А. и Н. В. Тимофеев-Ресовский, 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 Н. В. Тимофеев-Ресовский, 1959.** «Распределение рассеянных элементов по компонентам водоема, II. Почвенно-биологическая дезактивация воды в прудах-отстойниках». Сб. раб. Лаб. биофизики, УФАН, 2, Свердловск (в печати). **Титлянова А. А. и Н. А. Тимофеева ,1959.** «Судьба излучателей в почвах» (в печати).

Ответственный за выпуск **В. С. Гвоздев**

ЛБ01895 23/IV-59 г. Тир. 400 экз. 1959—2853
г. Пермь, ул. К. Маркса, 14, типография № 1 Облполиграфиздата