АКАДЕМИЯ НАУК СССР
УРАЛЬСКИЙ ФИЛИАЛ

ТРУДЫ ИНСТИТУТА БИОЛОГИИ

Вып. 12

СБОРНИК РАБОТ ЛАБОРАТОРИИ БИОФИЗИКИ

II

ПРОБЛЕМЫ БИОФИЗИКИ

ИЗДАТЕЛЬСТВО АКАДЕМИИ НАУК СССР
МОСКВА 1960

АКАДЕМИЯ НАУК СССР
УРАЛЬСКИЙ ФИЛИАЛ

ТРУДЫ ИНСТИТУТА БИОЛОГИИ

Вып. 12

СБОРНИК РАБОТ ЛАБОРАТОРИИ БИОФИЗИКИ

II

ПРОБЛЕМЫ БИОФИЗИКИ

ИЗДАТЕЛЬСТВО АКАДЕМИИ НАУК СССР
МОСКВА 1960

Ответственный редактор
В. Н. ПЕТРИ

ПРЕДИСЛОВИЕ

Во втором сборнике трудов Лаборатории биофизики рассматриваются в основном те же проблемы, материалы которых были опубликованы в первом сборнике.

Первые две статьи освещают влияние комплексонов на поведение в организме инкорпорированных металлов и излучателей. Третья работа, стоящая несколько особняком, знакомит с результатами опытов, поставленных с целью изучения влияния инкорпорированного радиоцерия на плодовитость мышей, развитие и радиорезистентность их потомства, а также проникновения излучателя через плаценту в зародыши и с молоком матери в новорожденных. Три следующие работы посвящены изучению противолучевых средств. Четыре работы представляют собой продолжение серии опытов по радиостимуляции растений. Наконец, четыре последние статьи близки в тематическом отношении работам по экспериментальной биогеоценологии, опубликованным в первом сборнике. Новые работы об изучении пресноводных организмов и водоемов выделены в особую серию по соображениям, изложенным в первом сообщении.

В дальнейшем, помимо начатых в первых двух сборниках, будут публиковаться еще две серии работ; исходной для одной из них, разбирающей вопрос проникновения инкорпорированных элементов через плаценту в зародыши и с молоком матери в новорожденных, послужит третья из печатающихся в настоящем сборнике работ.

Н. В. Тимофеев-Ресовский

АКАДЕМИЯ НАУК СССР
УРАЛЬСКИЙ ФИЛИАЛ

Вып. 12 ТРУДЫ ИНСТИТУТА БИОЛОГИИ 1960

И. П. ТРЕГУБЕНКО и Д. И. СЕМЕНОВ

ВЛИЯНИЕ КОМПЛЕКСОНОВ НА ПОВЕДЕНИЕ МЕТАЛЛОВ И ИЗЛУЧАТЕЛЕЙ В ОРГАНИЗМЕ

III. ФОСФАТЫ

ВВЕДЕНИЕ

В первых двух сообщениях этой серии было рассмотрено изменение поведения излучателей в организме под влиянием ЭДТА — комплексона, относящегося к группе азотсодержащих поликарбоксильных кислот. В настоящем сообщении приводятся результаты исследований, проведенных с комплексонами группы фосфатов.

Интерес к данной группе соединений продиктован, в основном, двумя обстоятельствами. Во-первых, фосфаты принимают участие в процессах минерального обмена в организме; имеются указания (Hodge, 1950, Malmgren, 1952) на наличие в клетках даже конденсированных фосфатов типа гексаметафосфата. Во-вторых, ввиду близости констант устойчивости комплексов конденсированных фосфатов с кальцием и стронцием можно было надеяться на эффективность их в выведении высокотоксичного радиостронция, в отношении которого остальные комплексоны не оказали действия.

В настоящее время неорганические фосфаты подразделяют на поли- и метафосфаты. Под полифосфатами подразумеваются линейные полимеры с общей формулой $(NaPO_3)_x \cdot Na_2O$ или $(NaPO_3)_x \cdot H_2O$; под метафосфатами — циклические полимеры с общей формулой $(NaPO_3)_x$. Высшей степенью полимеризации полифосфатов ($n=34$—88) является грэхемская соль, ранее неправильно именовавшаяся гексаметафосфатом.

Несмотря на то, что способность конденсированных фосфатов давать комплексные соединения с металлами стала использоваться вскоре после их открытия (1827), химия этих соединений до настоящего времени мало исследована. Меротра и Дхар (Mehrotra, Dhar, 1950) установили, что «гексаметафосфат» (ГМФ) образует комплексные соединения с Ca, Sr, Ba, Mg, Zn, Mn, Pb, Al, Be, La, Th, Zr, Ce, Fe, UO_2, хорошо растворяющиеся в избытке комплексона. Отсутствие данных по структуре этих соединений и их устойчивости объясняется экспериментальными трудностями, связанными с образованием нерастворимых комплексов при определенных соотношениях металл — комплексон в растворе. Ван Вацер и Кампанелла (Van Wazer, Campanella, 1950) приводят логарифмы констант устойчивости комплексов различных катионов с полифосфатом со сред-

ним числом PO_4 групп (n), равным 5, однако, как отмечают сами авторы, лученные величины сильно варьируют в зависимости от концентрации полифосфата и от предполагаемого координационного числа. Госселин и Кофлан (Gosselin, Coghlan, 1953), приводя логарифмы констант устойчивости комплексов кальция с различными фосфатами, определенные методом ионного обмена при физиологических условиях (0,15 М раствор NaCl; pH = 7,4; t = 37° С), указывают на то, что понятие средней молекулы» в применении к такой неопределенной смеси, как ГМФ, неправильно, так как аддендами могут являться лишь некоторые из присутствующих молекул. Этим они объясняют тот факт, что полученные ими величины для комплексов тримета- и тетраметафосфата с кальцием ниже истинных значений, установленных другими авторами (Jones, Monk, Davies, 1949; Jones, Monk, 1950) в условиях полной ионизации комплексона в растворе.

Однако ввиду того, что биолога интересуют в большей степени не истинные, а определенные при физиологических условиях константы устойчивости, мы приводим в табл. 1 данные Госселина и Кофлана жирным шрифтом; остальные величины, относящиеся к истинным константам устойчивости комплексов фосфатов с катионами различных металлов, должны быть при исчислении в физиологических условиях соответственно

Таблица 1

Логарифмы констант устойчивости комплексов фосфатов с различными катионами

Комплексон	Химическая формула	Ba	Sr	Mg	Ca	Ni	Mn	La
ГМФ	$Na_8P_6O_{19}$	—	—	—	**9,19**	—	—	—
Триполифосфат . .	$Na_5P_3O_{10}$	—	—	—	**4,32**	—	—	—
Пирофосфат . . .	$Na_4P_2O_7$	—	—	—	**3,47**	—	—	—
Тетраметафосфат	$Na_4P_4O_{12}$	5,0	5,15	5,2	**3,36** 5,36	4,9	5,7	6,6
Триметафосфат . .	$Na_3P_3O_9$	3,33	3,35	3,3	**2,50** 3,44	3,2	3,7	5,7
Ортофосфат . . .	Na_3PO_4	—	—	—	**1,79**	—	—	—

снижены. При этом, конечно, в отношении ГМФ остается в силе отмеченная выше условность, вытекающая не из методики определения, а из гетерогенности степени полимеризации этой соли и отсутствия данных о структуре образуемых ею комплексных соединений.

Обмен грэхемской соли был исследован Гётте (Götte, 1953). Он показал, что высокополимерная грэхемская соль при внутривенном введении быстро ($T_{1/2}$ ≈20 мин.) исчезает из кровяного русла и откладывается в основном в печени и селезенке. Значительное содержание ее в липоидах печени, куда включается лишь монофосфат, а также последующее выделение свидетельствуют о частичном расщеплении этой соли в организме. В течение 8—9 час. с мочой выделяется около 15% введенного количества грэхемской соли, частично в виде ортофосфата. Согласно данным Госселина и его сотрудников (1952, 1953), большая часть ГМФ и в особенности триполифосфата гидролизуется в организме крысы и кролика до ортофосфата; скорость и степень расщепления их зависят от дозы, пути введения и формы применяемой соли. Так, при подкожном введении натриевые соли обоих полифосфатов мобилизуются с места инъекции, а также расщепляются значительно быстрее, чем кальциевые комплексы их; однако относительно бо́льшая часть последних выделяется с мочой в гидролизованном состоянии. Тримета- и тетраметафосфаты выделяются с мочой без заметного расщепления.

При пероральном введении как линейные, так и циклические фосфаты гидролизуются полностью в желудочно-кишечном тракте. В каких тканях происходит расщепление полифосфатов при парэнтеральном их введении, не установлено, однако они выделяются только с мочой и не проникают в кишечник, в связи с чем участие последнего в их гидролизе исключено.

При парэнтеральном введении полифосфаты весьма токсичны. Это обусловлено, с одной стороны, гипокальцемией (Starkenstein, 1911; Tria, 1950; Tibdall a. oth., 1952) и падением кровяного давления (Behrens, Seelkopf, 1933), с другой,— ацидозом, возникающим вследствие энзиматического гидролиза полифосфатов (Tibdall a. oth., 1952). В отношении смертельных доз ГМФ для млекопитающих данные разных авторов расходятся довольно значительно, что, по-видимому, связано с методикой изготовления препарата. Так, по Беренсу и Зелькопфу (1933), эта доза при внутривенном введении составляет около 150 мг на 1 кг веса животного. По данным нашей лаборатории (Кач и Пани, 1952), доза, вызывающая смерть половины подопытных животных (ЛД — 50%), для крыс приближается к 80 мг на 1 кг; между тем Госселин и сотрудники (1953) приводят значительно более высокие дозы (табл. 2).

Таблица 2

Токсичность фосфатов при внутривенном введении крысам

Препарат	ЛД-50% в мг на 1 кг веса животного	
	препарат	в пересчете на фосфор
Пирофосфат натрия	243±13	59
Триполифосфат натрия	525±52	135
Гексаметафосфат натрия	690±160	192
Тетраметафосфат натрия	2630±280	741
Триметафосфат натрия	3650±620	1130
Ортофосфат натрия	—	326

Кальциевый комплекс ГМФ несколько менее токсичен: ЛД — 50% равняется 120 мг на 1 кг веса крысы (Кач и Пани, 1952; Трегубенко, 1955). В токсическом действии обоих препаратов наблюдаются существенные качественные различия. Гибель животных от Na ГМФ наступает во время или непосредственно после инъекции препарата и сопровождается угнетением дыхания и внезапной остановкой сердца; грубых морфологических изменений на вскрытии не отмечается. Са ГМФ не вызывает внезапной смерти: животные гибнут в течение первых двух суток при явлениях нарастающего нарушения дыхания, коматозного состояния, при кровоизлияниях из носовой и ротовой полостей. На вскрытии отмечаются множественные точечные кровоизлияния во внутренних органах, особенно выраженные в стенках желудка и кишечника. Вероятно, ведущим в токсическом действии Na ГМФ является кальцепривный эффект, в то время как при введении Са ГМФ наблюдаемые симптомы обусловлены развивающимся ацидозом.

При внутримышечном, внутрибрюшинном или подкожном введении препаратов ГМФ на месте инъекции возникают обширные некрозы.

В целях снижения развивающегося ацидоза была испытана комбинация Na ГМФ с метиленовой синью (Трегубенко, 1952, 1955), известной как акцептор водорода. Испытание показало, что добавление метиленовой сини снижает токсичность ГМФ в 1,6 раза, т. е. ЛД — 50% для крыс повышается до 120 мг на 1 кг. При этом эффективность препарата в смысле предотвращения отложения излучателей в органах не снижается.

Возможны, по-видимому, и другие пути снижения токсичности ГМФ, однако специально этим вопросом мы не занимались, так как считаем данный препарат малопригодным для практики. Целью настоящих исследований являлось скорее отыскание наиболее эффективных и вместе с тем наименее токсичных фосфатов, а также установление основных закономерностей их влияния на поведение излучателей в организме, что служило бы отправным пунктом для дальнейших исследований по этой обширной группе комплексонов.

МАТЕРИАЛ И МЕТОДИКА

Опыты проводились на белых крысах. Излучатели вводились в индикаторных количествах (2—5 мккюри) за исключением свинца, который применялся в виде азотнокислой соли в количестве 1 мг на крысу. Стронций и иттрий вводились в виде хлоридов, плутоний — в виде лимоннокислого комплекса.

Для специальных целей (изучение зависимости эффективности комплексона от весовой дозы излучателя) использовался стабильный иттрий (0,5 мг на крысу), меченный его радиоактивным изотопом Y^{90}.

Препарат ГМФ изготовляли следующим образом. Безводный фосфорнокислый натрий-аммоний ($NaNH_4 \cdot HPO_4$) после постепенного нагревания прокаливали 15 мин. при 700° С; полученный прозрачный сплав быстро охлаждали и растирали в ступке. Остальные фосфаты готовили по стандартной методике или же использовали готовые заводские препараты.

При изучении выделения излучателей с мочой и калом животные содержались в обменных клетках, позволявших собирать мочу и кал раздельно.

Методика обработки органов и тканей, а также изготовления проб для подсчета содержания в них радиоактивности была подробно изложена во втором сообщении (Семенов и Трегубенко, 1957).

РЕЗУЛЬТАТЫ ОПЫТОВ

Как и в предыдущих сообщениях, мы остановимся лишь на основных данных. Прежде всего рассмотрим отдельно каждый из факторов, влияющих на эффективность фосфатов, тем более что они сами по себе представляют существенный интерес.

Факторы, определяющие эффективность фосфатов

Доза ГМФ. Как при использовании других исследованных комплексонов, степень воздействия на отложение излучателей в органы зависит от дозы вводимого ГМФ. Однако, если другие комплексоны типа ЭДТА при любых дозах обусловливают снижение отложения излучателей в органах, то малые дозы ГМФ ведут, наоборот, к значительному повышению отложения иттрия (Семенов, 1952) и плутония (Трегубенко, 1952, 1955) в печени, почках (рис. 1 и 2). Интересно, что при более высоких дозах ГМФ этот эффект выражен слабее, а при максимально переносимых количествах его наблюдается даже некоторое снижение отложения плутония в печени. Трудно объяснимо вторичное повышение отложения плутония в почках при высоких дозах ГМФ.

В костной ткани под влиянием ГМФ наблюдается снижение отложения излучателей, причем этот эффект симбатен дозе комплексона.

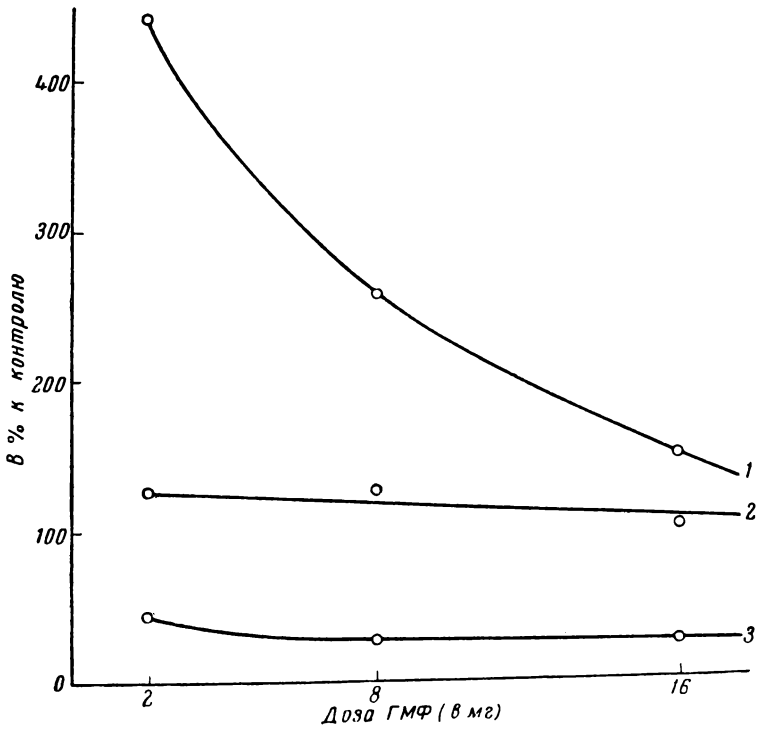


Рис. 1. Величина отложения радиоиттрия в печени (*1*), почках (*2*) и скелете (*3*) крыс в зависимости от дозы ГМФ (по данным Д. И. Семенова, 1952)

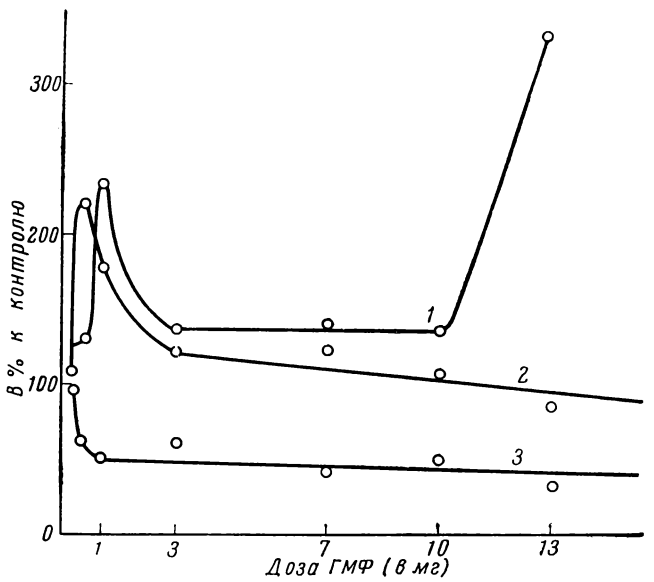


Рис. 2. Величина отложения плутония в почках (*1*), печени (*2*) и скелете (*3*) крыс в зависимости от дозы ГМФ (по данным И. П. Трегубенко, 1952, 1955)

Срок введения ГМФ. Эффективность ГМФ, как и других комплексонов, в значительной мере зависит от момента его применения (рис. 3). Что касается влияния на отложение излучателя в скелете, то зависимость эффекта от момента применения ГМФ вполне сходна с таковой, установленной для других комплексонов. Чем раньше до введения или чем позже после введения излучателя инъецируется ГМФ, тем менее снижается

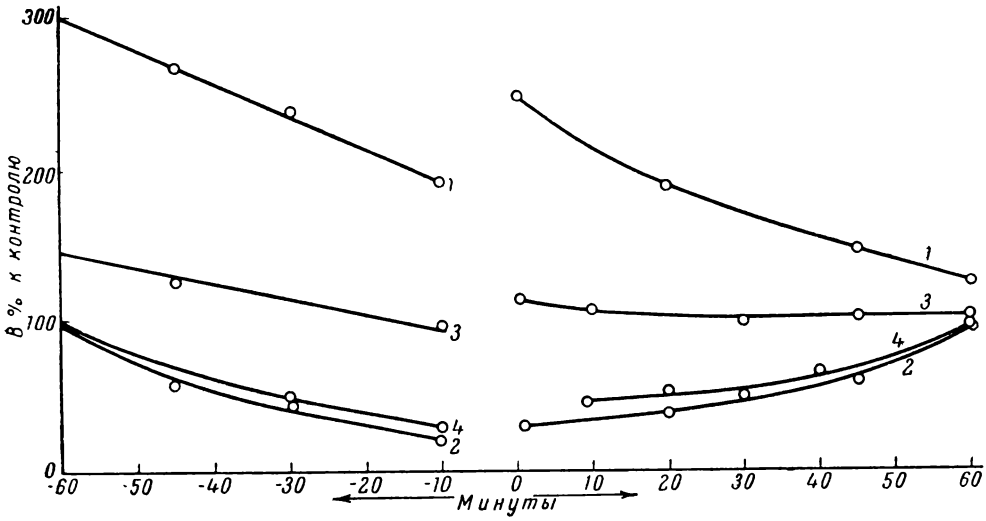


Рис. 3. Величина отложения радиоиттрия в печени (*1*) и скелете (*2*), а также плутония в печени (*3*) и скелете (*4*) крыс в зависимости от момента введения ГМФ; минуты до (—) или после (+) введения радиоактивного вещества
(по данным И. П. Трегубенко, 1955 и неопубликованным данным авторов)

отложение радиоизотопа в костной ткани. Это и понятно, так как в первом случае к моменту введения излучателя остается тем меньшая доля комплексона, чем раньше была произведена инъекция его; во втором же случае более поздняя инъекция ГМФ после введения излучателя оказывает меньший эффект потому, что к моменту применения комплексона значительная доля радиоизотопа успевает отложиться в тканях.

Иначе обстоит дело с влиянием ГМФ на отложение излучателей в печени. Как видно из рис. 3, применение ГМФ через час после инкорпорации иттрия или плутония, когда основная масса излучателей уже выбыла из кровяного русла, практически не влияет на величину их отложения в печени; более же раннее введение ГМФ после инкорпорации излучателей повышает отложение их в этом органе, причем с приближением срока инъекции комплексона к моменту инкорпорации излучателя этот эффект возрастает. Применение ГМФ до введения излучателей еще более выраженно повышает отложение плутония и иттрия в печени. В этом случае эффект усиливается с возрастанием интервала между предварительной инъекцией комплексона и введением излучателя, что можно объяснить, исходя из рассмотренной уже зависимости эффекта ГМФ от вводимой дозы, убыванием концентрации его в крови к моменту инкорпорации излучателя.

Способ введения ГМФ и триметафосфата. Ввиду того, что при многократном применении испытуемых препаратов на мелких лабораторных животных внутривенное введение представляет значительные трудности, в этом случае обычно пользуются внутрибрюшинным способом введения. Вполне понятно, что для сравнения данных, полученных при том или ином

способе введения, необходим строгий учет скорости и степени резорбции препарата из брюшной полости. С этой целью нами сравнивалась эффективность ГМФ и триметафосфата при внутривенном и внутрибрюшинном способе введения в предотвращении отложения в органах радиоиттрия (табл. 3).

Таблица 3

Влияние внутривенно или внутрибрюшинно введенных ГМФ и триметафосфата на отложение в органах крыс радиоиттрия

(в % от введенного)

Число крыс	4	4	4	4	4
Вес (в г)	156±2,8	160±2,5	157±1,8	162±2,2	152±1,5
Орган	Контроль	ГМФ		Триметафосфат	
		внутривенно	внутрибрюшинно	внутривенно	внутрибрюшинно
Печень	5,80	9,45	9,22	12,25	11,60
Почки	2,05	2,95	3,04	3,44	3,18
Скелет	53,20	21,30	23,05	33,70	31,95
Тушка	20,44	15,50	14,70	17,15	16,98

Результаты опыта, в котором испытуемые вещества вводились через 10 мин. после инкорпорации излучателя и все животные были забиты через два дня, указывают на одинаковую эффективность обоих способов введения, что говорит о быстрой и полной резорбции ГМФ и триметафосфата из брюшной полости.

Форма препарата ГМФ. В связи с тем, что Са ГМФ несколько менее токсичен, чем Na ГМФ, представляло интерес сравнить эффективность обеих форм комплексона в предотвращении отложения излучателей в органах. С этой целью через 10 мин. после внутрибрюшинного введения плутония крысам вводили внутривенно по 10 мг Na ГМФ или Са ГМФ.

Таблица 4

Сравнение влияния Na ГМФ и Са ГМФ на отложение в органах крыс и выделение с мочой и калом плутония

(в % от введенного)

Число крыс	4	4	4
Вес (в г)	152±3,4	154 ± 1,2	153 ± 2,0
Органы и выделения	Контроль	Na ГМФ	Са ГМФ
Печень	10,76 ± 0,93	13,48 ± 1,37	12,82 ± 0,85
Почки	0,75 ± 0,11	1,70 ± 0,34	1,32 ± 0,18
Селезенка	1,12 ± 0,27	1,64 ± 0,28	0,93 ± 0,10
Скелет	58,40 ± 1,91	33,60 ± 3,32	30,15 ± 1,62
Моча	1,31 ± 0,24	7,59 ± 1,93	5,00 ± 1,14
Кал	6,36 ± 0,90	5,49 ± 0,25	5,75 ± 0,42

Животных содержали в обменных клетках четыре дня, а затем забивали для определения содержания излучателя в органах (Трегубенко, 1952, 1955). Результаты опыта, приведенные в табл. 4, показали полную идентичность действия этих препаратов.

Как видно из таблицы, различия в величинах содержания радиоактивных веществ в скелете и моче у животных контрольной и подопытных групп статистически недостоверны ($P=0,5$).

К сожалению, ввиду высокой токсичности препаратов ГМФ мы были лишены возможности исследовать эффективность натриевой и кальциевой форм его при позднем применении в течение длительного времени, что представляло бы существенный интерес, учитывая различия, установленные в опытах с Na ЭДТА и Ca ЭДТА (Семенов и Трегубенко, 1957).

Весомость излучателя. Весомость таких излучателей, как иттрий, свинец и др., обусловливает существенные различия их поведения в организме при внутривенном введении. Это, несомненно, связано с различиями в физико-химическом состоянии весомых и невесомых количеств излучателей в крови и межтканевой жидкости. Поэтому сопоставление влияния комплексона на поведение невесомых и весомых количеств излучателя позволяет судить о роли физико-химического состояния металла в крови в определении эффективности данного комплексона, или, иначе говоря, выяснить способность последнего конкурировать с теми процессами в жидкостях организма, которые ответственны за переход инкорпорируемых катионов излучателя в данное физико-химическое состояние.

Подобный опыт был поставлен (Семенов, 1952) на двух группах крыс. Животным первой группы вводили внутривенно по 3 мккюри радиоиттрия без носителя, второй — также внутривенно по 3 мккюри радиоиттрия с добавлением 0,4 мг стабильного иттрия в виде хлорида. Через одну минуту части крыс из обеих групп инъецировали внутривенно по 8 мг Na ГМФ. Через двое суток всех животных забивали для определения содержания излучателя в органах (табл. 5).

Таблица 5

Сравнение влияния Na ГМФ на отложение в органах невесомого и весомого иттрия

(в % от введенного)

Число крыс	4	5	3	3
Вес. (в г)	137 ± 2,3	140 ± 2,6	114 ± 0,4	127 ± 6,95
Орган	Невесомый иттрий		Весомый иттрий	
	контроль	ГМФ	контроль	ГМФ
Печень	5,60 ± 0,14	14,60 ± 1,47	60,85 ± 3,66	41,80 ± 3,43
Почки	2,65 ± 0,12	3,39 ± 0,74	1,15 ± 0,05	0,83 ± 0,13
Скелет	47,20 ± 1,45	12,70 ± 1,20	11,80 ± 0,61	11,20 ± 0,70
Тушка	25,61 ± 2,78	17,46 ± 1,43	19,03 ± 1,25	20,45 ± 2,48
Итого в крысе	81,06 ± 1,28	48,15 ± 2,85	92,83 ± 0,78	74,28 ± 2,81

Результаты этого опыта показали, что весомость излучателя очень резко сказывается на эффективности действия комплексона: общее отложение невесомого иттрия в организме крысы снижается под действием ГМФ в большей степени, чем весомого иттрия. Имеются также существенные различия во влиянии ГМФ на отложение тех и других количеств излучателя в отдельных органах. Так, если под влиянием ГМФ отложение невесомого иттрия в печени возрастает с 5,60 до 14,60%, то отложение весомого иттрия, наоборот, снижается с 60,85 до 41,80%; в то же время ГМФ резко снижает отложение невесомого иттрия в скелете и не оказывает влияния на отложение в нем весомого иттрия. Эти разли-

чия, причины которых еще далеко не выяснены, указывают на существенное значение физико-химического состояния излучателя в жидкостях организма, что определяет не только характер распределения излучателя по органам, но и взаимоотношения различных фракций инкорпорированного металла с вводимыми извне и присутствующими в организме комплексонами. Именно наличие различий как в поведении, так и в отношении к комплексонам весомых и невесомых количеств металла заставляет нас приписывать биокомплексонам главенствующую роль в определении поведения инкорпорируемых металлов в организме.

Предотвращение отложения металлов и излучателей в органах и ускорение выделения их

В данном разделе приводятся результаты исследований влияния различных фосфатов, во-первых, на отложение в органах и выделение из организма только что поступивших в кровяное русло излучателей (раннее применение комплексонов), а во-вторых, на выделение из органов и тканей уже отложившихся в них излучателей (позднее применение комплексонов).

Предлагаемый материал не претендует на достаточную систематичность. Сравнение эффективности различных фосфатов проведено лишь на одном излучателе — плутонии. Исследования с ГМФ ограничиваются только ранним применением, ввиду того, что многократное внутрибрюшинное введение его, применявшееся нами при изучении поздней эффективности комплексона, ведет к гибели животных. Эффективность при позднем применении изучалась только с триметафосфатом и то лишь в отношении радиостронция. Наконец, в опытах со стронцием и свинцом не прослеживалось выделение излучателей с мочой и калом, что лишает нас возможности представить полный баланс введенной в организм радиоактивности.

Несмотря на эти недостатки, нам кажется, излагаемый материал может послужить основой для дальнейшего изучения влияния фосфатов на минеральный обмен в организме.

Стронций. Исходя из установленного в лаборатории факта, что раннее применение ГМФ в значительной мере предотвращает отложение стронция в скелете и повышает выделение его с мочой, можно было ожидать, что и позднее применение ГМФ также окажется эффективным в смысле ускорения выделения стронция из скелета, хотя подобное предположение весьма произвольно.

К примеру, можно указать на лимонную кислоту, которая, будучи инъецирована вскоре после инкорпорации радиостронция, резко повышает выделение его из организма, в то время как позднее применение этой кислоты не дает эффекта.

Учитывая высокую токсичность ГМФ, для многократного введения был использован триметафосфат (Семенов, 1953), который, согласно данным табл. 2, обладает наименьшей токсичностью.

Результаты опыта, в котором, начиная с 21-го дня после внутривенного введения радиостронция, крысам инъецировалось в течение 12 дней внутрибрюшинно по 40 мг триметафосфата, представлены в табл. 6. Как видно из приведенных данных, содержание стронция в скелете крыс, получавших инъекции триметафосфата, на 4,3% ниже, чем у контрольных. Если же представить это снижение не в процентах от введенного радиостронция, а в процентах от содержащегося стронция в скелете контрольных крыс, то эффективность триметафосфата выразится в выведении 13% излучателя.

Учитывая малую токсичность триметафосфата, можно ожидать, что при более длительном применении больших доз его удастся получить еще

более выраженный эффект. Мы же в данном случае стремились показать лишь возможность повышения выделения отложившегося в скелете стронция, чего нельзя было достигнуть при помощи других исследованных комплексонов.

Таблица 6

Влияние многократного введения триметафосфата на содержание стронция (в % от введенного) в скелете крыс к 33-му дню опыта

Число крыс	3	3	
Вес (в г)	178 ± 2,0	175 ± 3,4	*P*
Орган	Контроль	Триметафосфат	
Скелет	33,5 ± 0,94	29,2 ± 1,18	0,019

Приведенные данные говорят о том, что поиски эффективных в отношении радиостронция комплексонов следует направить в первую очередь на те из них, которые обладают со стронцием, если не положительной, то во всяком случае малой отрицательной константой вытеснения Са (Семенов, 1957) и, в частности, соединения из группы фосфатов.

Иттрий. В отношении радиоиттрия были испытаны ортофосфат натрия и ГМФ. Оба препарата, введенные через 2 мин. после инкорпорации излучателя, резко снижают отложение его в скелете и повышают выделение его с мочой, а также отложение в мягких тканях и особенно в печени. При этом наблюдается уже отмеченная зависимость эффекта от дозы ГМФ. В общем ГМФ (табл. 7 и рис. 4) оказывает более выраженное влияние на поведение иттрия, нежели ортофосфат (табл. 8); 50 мг последнего дает примерно такой же эффект, как 2 мг ГМФ.

Таблица 7

Влияние ГМФ на отложение иттрия (в % от введенного) в органах и тканях крыс ко второму дню

Число крыс	4	4	5	4
Вес (в г)	137 ± 2,3	146 ± 3,1	140 ± 2,6	146 ± 4,4
Орган	Доза ГМФ (в мг)			
	0	2	8	16
Печень	5,60 ± 0,14	24,63 ± 1,86	14,60 ± 1,47	8,68 ± 1,32
Почки . . .	2,65 ± 0,12	3,34 ± 0,18	3,39 ± 0,74	2,92 ± 0,18
Скелет . . .	47,20 ± 1,45	21,40 ± 1,28	12,70 ± 1,20	11,85 ± 1,72
Тушка	25,61 ± 2,78	18,43 ± 2,08	17,46 ± 1,43	—
Итого в крысе . . .	81,06 ± 1,28	67,80 ± 4,01	48,15 ± 2,85	—

В другом опыте было прослежено выделение радиоиттрия с мочой и калом как у контрольных, так и у получивших инъекцию ГМФ крыс, содержавшихся в обменных клетках шесть дней. На основании средних данных по каждой группе, состоящей из двух крыс, были вычерчены кривые суммарного выделения излучателя с мочой (рис. 5) и калом (рис. 6).

Как видно из этих кривых, общее количество выделенной с мочой и калом радиоактивности за первые два дня хорошо соответствует коли-

Таблица 8

Влияние ортофосфата на отложение иттрия (в % от введенного) в органах крыс ко второму дню

Число крыс	4	3	
Вес (в г)	137 ± 0,7	140 ± 1,0	P
Орган	Контроль	50 мг Na_2PO_4	
Печень	5,73 ± 0,62	17,05 ± 1,85	0,0012
Почки	2,77 ± 0,40	2,50 ± 0,10	0,6
Скелет	63,40 ± 3,61	32,80 + 1,32	0,0002

честву иттрия, оставшегося к этому сроку в организме крыс в предыдущем опыте (табл. 7).

Интересно отметить, что повышенное выделение иттрия с мочой под влиянием ГМФ в отличие от ЭДТА длится не только в течение первого, но и второго дня. Это указывает на медленный обмен полифосфата в организме.

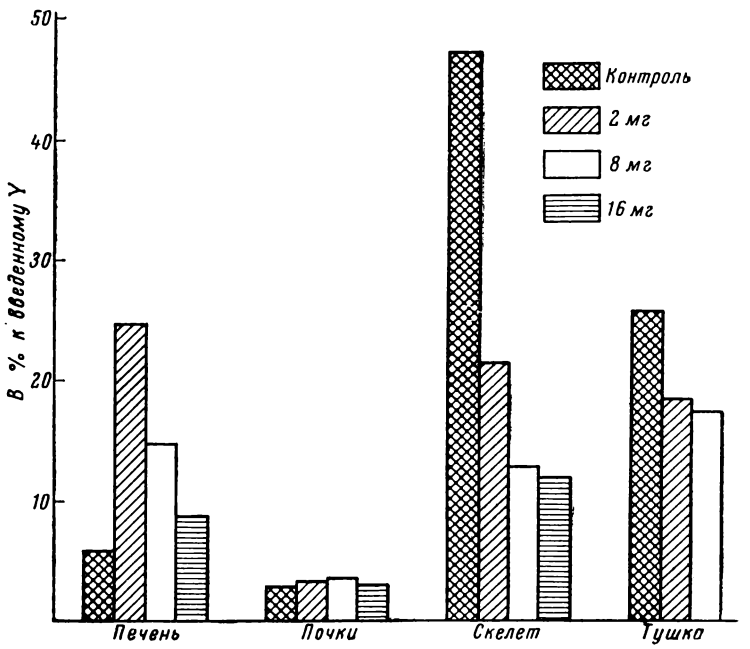


Рис. 4. Влияние разных доз ГМФ на отложение радиоиттрия в органах крыс (по данным Д. И. Семенова, 1952)

Свинец. Инъекция 8 мг ГМФ через 1 мин. после внутривенного введения радиосвинца в весомых количествах (Семенов, 1952) оказывает незначительный эффект на поведение излучателя в организме (табл. 9); статистически достоверно (P=0,028) лишь некоторое снижение отложения свинца в скелете.

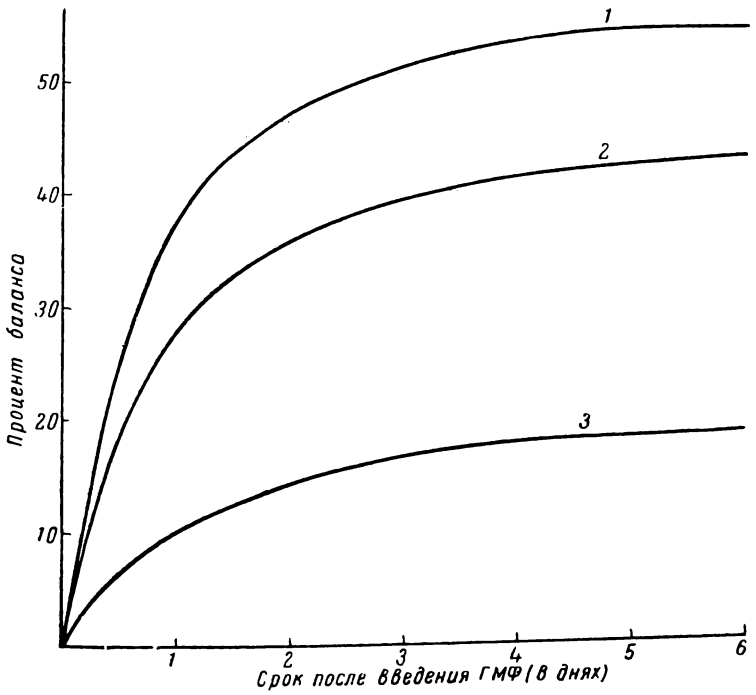


Рис. 5. Кумулятивное выделение радиоиттрия с мочой у крыс после инъекции ГМФ в дозах 8 *мг* (*1*) и 2 *мг* (*2*); *3* — контроль (по данным Д. И. Семенова, 1952)

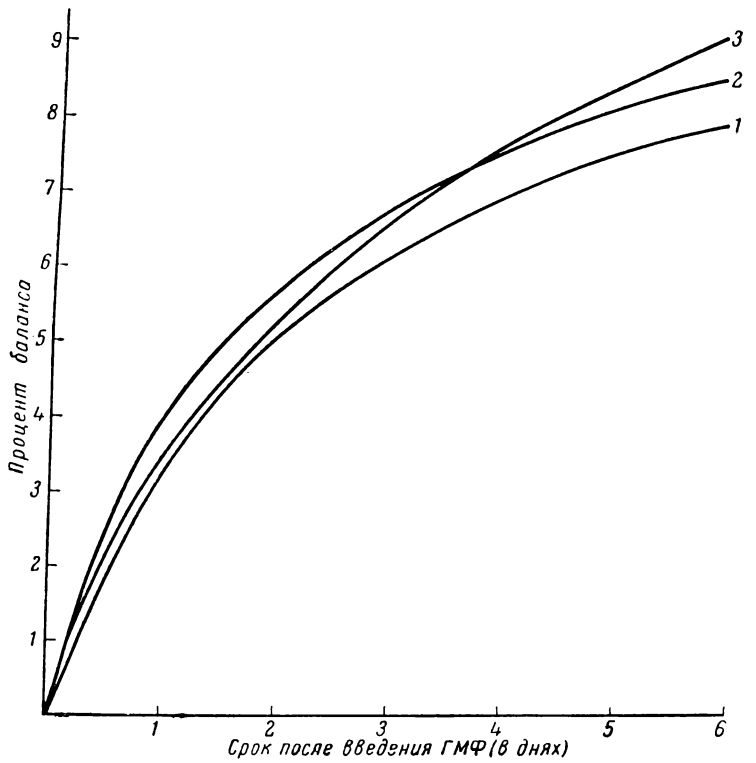


Рис. 6. Кумулятивное выделение радиоиттрия с калом у крыс после инъекции ГМФ в дозах 8 *мг* (*1*) и 2 *мг* (*2*); *3* — контроль (по данным Д. И. Семенова, 1952)

Исходя из рассмотренной выше зависимости эффективности ГМФ от весовой дозы излучателя, можно полагать, что в отношении невесомых количеств свинца ГМФ окажет значительно более выраженный эффект; подобных опытов, однако, мы не проводили.

Таблица 9

Влияние ГМФ на отложение свинца (в % от введенного) в органах крыс к 24-му часу опыта

Число крыс	3	3
Вес (в г)	126 ± 2,5	116 ± 1,4
Орган	Контроль	ГМФ
Печень	4,00 ± 1,27	3,75 ± 0,86
Селезенка . .	0,20 ± 0,07	0,16 ± 0,0002
Почки	5,43 ± 1,58	2,82 ± 0,47
Скелет	36,00 ± 2,25	25,87 ± 1,96

Плутоний. Обстоятельные исследования по влиянию различных фосфатов были проведены с плутонием (Трегубенко, 1955). Здесь мы остановимся лишь на наиболее существенных из полученных результатов.

Опыт, в ходе которого через 10 мин. после внутрибрюшинного введения плутония крысам инъецировалось внутривенно по 13 мг ГМФ, показал, что влияние комплексона выражается в некотором увеличении отложения излучателя в мягких тканях и в резком снижении отложения его в скелете (табл. 10).

Таблица 10

Влияние ГМФ на отложение плутония (в % от введенного) в органах крыс к четвертому дню опыта

Число крыс	18	18
Вес (в г)	174 ± 0,3	176 ± 0,2
Орган	Контроль	ГМФ
Печень	15,97 ± 0,082	16,36 ± 0,222
Почки	2,82 ± 0,085	3,87 ± 0,219
Селезенка . .	0,81 ± 0,0006	1,45 ± 0,062
Скелет	53,60 ± 0,475	18,20 ± 0,312

При этом наблюдается явная зависимость эффективности от дозы ГМФ (рис. 7).

Такое изменение поведения плутония в организме, обусловленное инъекцией ГМФ, вызывает значительное повышение выделения его с мочой. Крысы, которым через 10 мин. после внутрибрюшинного введения плутония было инъецировано внутривенно по 10 мг ГМФ, выделили с мочой за четверо суток свыше 30% инкорпорированного плутония, в то время, как контрольные животные — только 1,47% (рис. 8); увеличение содержания плутония в кале подопытных крыс, по-видимому, обусловлено случайным загрязнением кала радиоактивностью мочи, так как

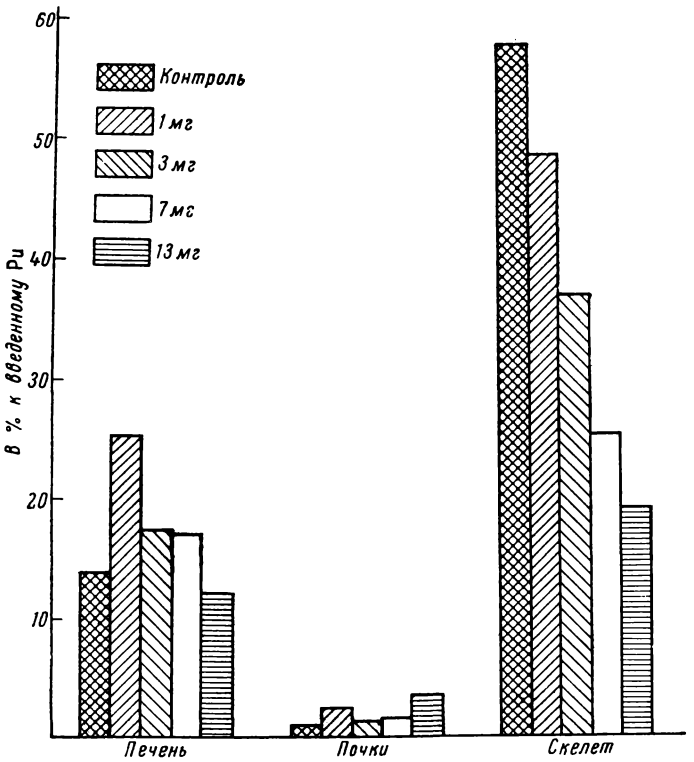


Рис. 7. Влияние разных доз ГМФ на отложение плутония в органах крыс (по данным И. П. Трегубенко, 1952, 1955)

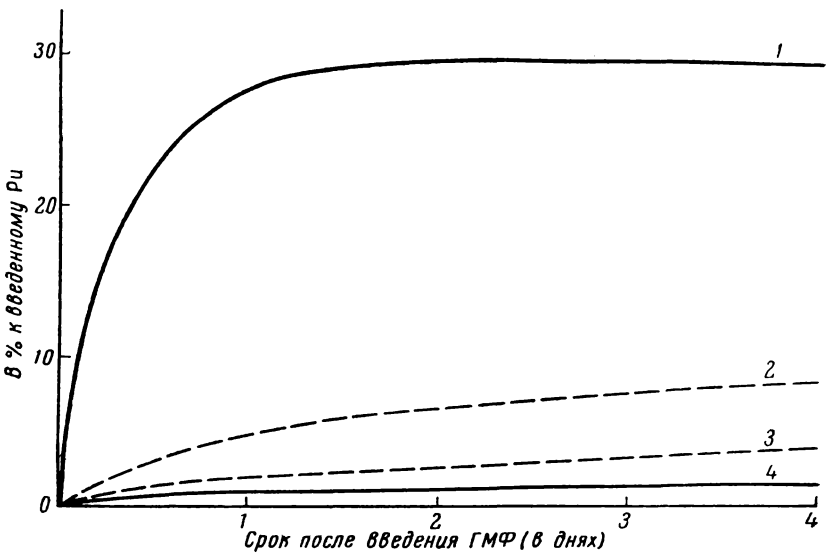


Рис. 8. Кумулятивное выделение плутония с мочой и калом у крыс после инъекции ГМФ:

1 — с мочой; *2* — с калом; *3* — с калом (контроль); *4* — с мочой (контроль) (по данным И. П. Трегубенко, 1955)

в других опытах обычно отмечалось лишь незначительное повышение выделения излучателя с калом под влиянием ГМФ.

В целях сравнения эффективности различных фосфатов в предотвращении отложения плутония в органах был поставлен опыт, в котором крысам вводилось внутривенно по 10 *мг* соответствующего фосфата через 10 мин. после внутрибрюшинного введения излучателя.

Таблица 11

Влияние различных фосфатов на отложение плутония (в % от введенного) в органах крыс к четвертому дню опыта

Фосфат	Число крыс	Вес в г	Печень	Почки	Селезенка	Скелет
Орто-	5	131 ± 2,1	13,2 ± 1,95	0,97 ± 0,07	0,62 ± 0,04	62,6 ± 1,96
Пиро-	5	127 ± 2,5	12,4 + 1,71	0,89 ± 0,07	0,80 ± 0,08	62,4 ± 3,77
Тримета- . . .	5	145 ± 2,8	15,9 ± 2,62	1,09 ± 0,03	0,77 ± 0,12	57,4 ± 3,13
Тетрамета- . .	5	132 ± 1,4	18,3 ± 2,34	0,97 ± 0,06	0,63 ± 0,09	56,7 ± 6,90
Триполи- . . .	5	130 ± 2,2	12,6 ± 1,88	0,96 ± 0,10	0,94 ± 0,12	65,5 ± 2,78
Тетраполи- . .	5	141 ± 1,8	14,1 ± 2,54	0,88 ± 0,07	0,82 ± 0,21	54,8 ± 6,01
ГМФ	5	136 ± 2,6	9,2 ± 1,40	1,73 ± 0,29	1,00 ± 0,28	25,5 ± 2,71
Контроль . . .	5	128 ± 1,5	11,1 ± 0,47	0,91 ± 0,06	0,69 ± 0,05	74,5 ± 1,63

Результаты, представленные в табл. 11, показывают, что ни один из фосфатов не влияет на отложение излучателя в паренхиматозных органах, за исключением тетраметафосфата, который статистически достоверно ($P = 0{,}018$) повысил содержание плутония в печени. В то же время все фосфаты статистически достоверно ($P = 0{,}002$—$0{,}045$) снижают отложение плутония в скелете; наиболее эффективным в этом отношении оказался ГМФ.

ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ

Представленные в этом сообщении данные отнюдь не являются исчерпывающими. Отсутствие данных о влиянии на поведение металлов в организме таких важных соединений, как нуклеиновые кислоты, аденозинтрифосфат и пр., является существенным пробелом в представлении о роли фосфорсодержащих биокомплексонов в минеральном обмене. Между тем совершенно очевидно, что присутствующие в жидкостях организма фосфаты в значительной мере определяют физико-химическое состояние, а следовательно, и поведение поступающих извне, а также находящихся в организме металлов. На это указывают, в частности, хорошо известное постоянство соотношения Ca : P в крови и в костной ткани, предположение о роли нуклеиновых кислот в фиксировании катионов на поверхности клетки, а также данные, приведенные в настоящем сообщении.

Несмотря на довольно обширную литературу по обмену органических фосфатов и ортофосфата, совершенно отсутствуют данные не только по обмену, но и о наличии в сложных организмах поли- и метафосфатов. Нам кажется, что присутствие полимеров метафосфатов в дрожжевых клетках, а также факт расщепления полифосфатов в тканях служит достаточным основанием, чтобы считать их не совсем чуждыми животному организму. Можно полагать, что изучение обмена меченых поли- и метафосфатов позволит получить много неожиданных и интересных сведений.

Мы не считаем возможным на основании уже полученных нами результатов рекомендовать какой-либо из исследованных фосфатов для клинического применения при отравлении организма излучателями или токсическими металлами; для этой цели наиболее подходящим пока продолжает оставаться ЭДТА. Однако полностью отвергнуть практическую ценность полученных результатов нельзя. Если в выведении из организма большинства излучателей и токсических металлов ЭДТА и подобные ему комплексоны обладают значительными преимуществами перед конденсированными фосфатами, то не надо забывать, что последние оказались единственными эффективными в отношении депонированного в скелете радиостронция, представляющего особенно большую опасность ввиду хорошей всасываемости его из легких и кишечника и длительной задержки в костной ткани. В этом отношении малая токсичность и отсутствие заметного расщепления в тканях триметафосфата должны быть приняты во внимание.

С теоретической точки зрения существенный интерес представляет специфика зависимости между дозой фосфата и его влиянием на отложение излучателей. Все фосфаты ведут к повышению отложения излучателей в паренхиматозных органах, причем этот эффект особенно выражен при введении комплексонов в малых дозах. Из химии фосфатов известно, что тип и растворимость их комплексов с металлами в значительной степени зависит от соотношения металл — комплексон: полифосфаты образуют с металлами нерастворимые комплексные соединения, которые растворяются в избытке комплексона.

Конечно, даже доза ГМФ в 1 мг несоизмеримо велика по сравнению с вводимым крысе невесомым количеством плутония (10^{-5} мг) или итрия (10^{-13} мг), однако этот избыток полифосфата перекрывается присутствующими в жидкостях организма катионами. Примерный расчет показывает, что только кальций крови и межтканевой жидкости по молярности превышает на два порядка величин количество вводимого комплексона. Присутствие в крови также и других катионов (Zn, Fe, Pb и пр.), дающих еще более устойчивые соединения с комплексонами, нежели Ca, создает условия, в которых излучателю приходится вступать с ними в сложные конкурентные отношения за комплексон.

Повышенное отложение излучателя в паренхиматозных органах, наблюдаемое в наших опытах, несомненно обусловлено образованием труднорастворимых фосфатов, причем тем в большей степени, чем ниже вводимая доза комплексона. Однако такое объяснение было бы весьма односторонним, так как даже при наименьших примененных количествах фосфатов наряду с повышенным отложением в мягких органах наблюдалось и повышенное выделение излучателя с мочой. Очевидно, надо принять, что создаваемая нами повышенная концентрация фосфатов в крови смещает обычное соотношение физико-химических фракций исследуемого излучателя как в сторону захватываемых паренхиматозными органами частиц, так и в сторону частиц, фильтрующихся через мембрану клубочков почек. Это смещение идет за счет фракции, откладывающейся в отсутствие комплексона в костной ткани, чем и обусловлено снижение отложения излучателя в скелете.

В связи с тем, что фосфаты относятся к «низкопороговым» веществам, выделение скомплексованного излучателя повышено даже при наименьших испытанных дозах комплексона. Дальнейшее увеличение количества вводимого фосфата ведет ко все более высокому выделению излучателя с мочой (к смещению в сторону фильтрующейся фракции), чем и объясняется симбатность дозе комплексона как снижения отложения излучателя в скелете и паренхиматозных органах, так и повышения выделения его с мочой.

В заключение хотелось бы остановиться на зависимости между эффективностью фосфатов и устойчивостью образуемых ими комплексов с металлами. Хотя константы устойчивости комплексов исследованных фосфатов с плутонием и не известны, можно утверждать, что по своему расположению они не будут существенно отличаться от расположения констант устойчивости комплексов с кальцием (см. табл. 1). Поэтому возрастающая в следующем порядке: орто-тримета-, тетрамета-, триполи-, тетраполи-, гексамета-, эффективность фосфатов в предотвращении отложения плутония в скелете (см. табл. 11) еще раз подчеркивает правильность ранее высказанного положения о том, что эффективность комплексонов симбатна константе устойчивости образуемых ими комплексов с металлами.

ВЫВОДЫ

1. Поли- и метафосфаты, введенные парэнтерально предварительно, одновременно или вскоре после инкорпорации излучателей, резко снижают отложение их в скелете, повышают выделение с мочой, а также усиливают отложение их в паренхиматозных органах.

2. Чем ниже доза вводимого фосфата, тем меньше эффект в отношении отложения в скелете и выделения излучателя с мочой, но тем резче выражено повышение отложения его в мягких органах.

3. Чем меньшую долю излучателя застает в крови инъецированный фосфат, тем менее выражено его влияние на отложение в органах и на выделение излучателя с мочой.

4. Фосфаты в отношении большинства металлов менее эффективны, чем ЭДТА. Однако, в отличие от последнего, они повышают выделение радиостронция из скелета.

5. Малая токсичность и отсутствие заметного расщепления триметафосфата в организме наряду со способностью его элюировать радиостронций из костной ткани заслуживают особого внимания со стороны клиницистов.

ЛИТЕРАТУРА

Кач А. З. и Пани Г. Э. Гексаметафосфат. Отчет 1952 г. Рукопись. Свердловск. Фонд УФАН СССР.

Семенов Д. И. Влияние ГМФ на поведение иттрия в организме. Отчет 1952 г. Рукопись. Свердловск. Фонд УФАН СССР.

Семенов Д. И. Влияние ГМФ на поведение свинца в организме. Отчет 1952 г. Рукопись. Свердловск. Фонд УФАН СССР.

Семенов Д. И. Эффективность комплексонов в опытах по выведению из организма излучателей при позднем длительном применении их. Отчет 1953 г. Рукопись. Свердловск. Фонд УФАН СССР.

Семенов Д. И. Влияние комплексонов на поведение металлов и излучателей. I. Механизм действия комплексонов. Тр. Ин-та биол. УФАН СССР, вып. 9. Свердловск, 1957.

Семенов Д. И. и Трегубенко И. П. Влияние комплексонов на поведение металлов и излучателей в организме. II. Этилендиаминтетраацетат. Тр. Ин-та биол. УФАН СССР, Вып. 9. Свердловск, 1957.

Трегубенко И. П. Опыты по комбинированному действию ГМФ и метиленовой сини. Отчет, 1952 г. Рукопись. Свердловск. Фонд УФАН СССР.

Трегубенко И. П. Влияние I МФ на поведение плутония в организме. Отчет 1952 г.; Рукопись; Свердловск. Фонд УФАН СССР.

Трегубенко И. П. Распределение плутония в организме и методы экспериментального воздействия на темп его выделения. Диссертация. АМН СССР, 1955.

Behrens B., Seelkopf K. Zur Pharmakologie der Metaphosphorsäuren. Arch. Exp. Path. u. Pharm., 1933, **169**, 238.

Gosselin R. E., Coghlan E. R. The stability of complexes between calcium and orthophosphate, polimeric phosphate and phytate. Arch. Biochem. a. Bioph., 1953, **45**, 301.

Gosselin R. E., Rothstein A., Miller G. F., Berke H. L. The hydrolisis and excretion of polimeric phosphate. J. Pharm. Exptl. Therap., 1952, **106**, 180.

Gosselin R. E., Tibdall C. S., Megirian R., Maynard E. A., Downs W. L., Hodge H. C. Metabolic acidosis and hypocalcemia as toxic manifestations of polimeric phosphates. J. Pharm. Exptl. Therap., 1953, **108**, 117.
Götte H. Untersuchungen mit hochpolymeren radioaktiv markierten Phosphaten im Säugetierorganismus. Z. Naturforsch., 1953, **8b**., 4, 173.
Götte H., Frimmer M. Blutvolumenbestimmung mit radioaktiv markierten hochpolymeren Phosphaten. Angew. Chem., 1953, 52.
Hodge H. C. Pharmacologic tools in the study of the mechanism of uranium poisoning. Arch. Ind. Hyg. Occup. Med., 1950, **2**, 300.
Jones H. W., Monk C. B. The condensed phosphoric acids and their salts. V. Dissociation constants of some tetrametaphosphates. J. Chem. Soc., 1950, 3475.
Jones H. W., Monk C. B., Davies C. W. The condensed phosphoric acids and their salts. IV. Dissociation constants of some trimetaphosphates. J. Chem. Soc., 1949, 2693.
Malmgren H. A contribution to the physical chemistry of colloid metaphosphates. II. Acta Chem. Scand., 1952, **6**, 1, 1.
Mehrotra R. C., Dhar N. R. Hexametaphosphates. I. Preparation and properties of sodium hexametaphosphate and a study of the extent of complex formation with calcium ions by conductivity data. Proc. Natl. Inst. Sci. India, 1950, **16**, 59.
Monk C. B. The condensed phosphoric acids and their salts. VI. Dissociation constants of strontium trimetaphosphate and tetrametaphosphate. J. Chem. Soc., 1952, 1314, 1317.
Starkenstein E. Ionen Wirkung der Phosphorsäuren. Biochem. Zschr., 1911 (Berlin), **32**, 243.
Tibdall C. S., Gosselin R. E., Rene R. M. Mechanisms responsible for acute toxicity of a phosphate glass. Fed. Proc., 1952, II, 1, I, 162.
Tria E. Biological action of sodiumhexametaphosphate. Bill. Soc. ital. biol. sper., 1950, **26**, 113.
Van Wazer J. R., Campanella D. A. Structure and properties of the condensed phosphates. IV. Complex ion formation in polyphosphate solutions. J. Am. Chem. Soc., 1950. **72**, 2, 655.

АКАДЕМИЯ НАУК СССР
УРАЛЬСКИЙ ФИЛИАЛ

Вып. 12 ТРУДЫ ИНСТИТУТА БИОЛОГИИ 1960

Д. И. СЕМЕНОВ и И. П. ТРЕГУБЕНКО

ВЛИЯНИЕ КОМПЛЕКСОНОВ НА ПОВЕДЕНИЕ МЕТАЛЛОВ И ИЗЛУЧАТЕЛЕЙ В ОРГАНИЗМЕ

IV. СРАВНЕНИЕ ДЕЙСТВИЯ РАЗЛИЧНЫХ КОМПЛЕКСОНОВ

ВВЕДЕНИЕ

Исследования поведения в организме радиоактивных изотопов металлов, проводимые в нашей лаборатории с 1948 г., позволили сделать интересные выводы, имеющие важное значение для понимания механизмов, определяющих судьбу инкорпорированного металла. Сравнительное рассмотрение скорости всасывания из различных первичных депо, характера распределения по тканям, а также путей и интенсивности выделения инкорпорированных излучателей привело к установлению закономерностей, свидетельствующих о том, что основную роль в минеральном обмене живого организма играют физико-химические факторы.

Одна из важных физико-химических закономерностей — зависимость величины всасывания данной соли в кровь от ее растворимости — была известна уже исследователям прошлого века. Применение метода меченых атомов открыло перед экспериментаторами замечательные возможности в смысле точного количественного подхода к изучению других закономерностей, среди которых в первую очередь следует отметить зависимость поведения металла в организме от вводимой дозы. Если в прошлом исследование этой зависимости ограничивалось, с одной стороны, малой чувствительностью применявшихся методов химического анализа, а с другой,— токсическим действием больших доз металла, то в настоящее время первое из этих ограничений полностью отпадает. Теперь мы по сути дела в состоянии зарегистрировать каждый распадающийся радиоактивный атом. Правда, обычно применяемые в биологических опытах методы регистрации радиоактивности менее чувствительны, но они все же дают возможность точного определения содержания в тканях и органах излучателя, введенного в количестве 10^{-10}—10^{-14} г на 1 кг веса животного. Ввиду того, что токсические дозировки для большинства металлов превышают 10^{-3} г/кг, метод меченых атомов позволяет путем постепенного добавления стабильного изотопа к микроколичествам излучателя исследовать в очень широких пределах влияние весовой дозы на поведение инкорпорированного металла.

Изучение этой зависимости привело к весьма интересным соображениям об определяющем поведение металла в организме значении различных физико-химических фракций, в которые инкорпорируемые соли металлов переходят в крови и межтканевые жидкости.

Эти соображения в сочетании с данными по влиянию комплексонов на поведение излучателей в организме приводят нас к гипотезе о роли биокомплексонов в образовании различных физико-химических фракций данного металла в крови, а следовательно, и о непосредственном участии биокомплексонов в минеральном обмене.

Особенно интересные данные, способствовавшие построению этой гипотезы, были получены при изучении поведения в организме комплексных соединений в весомых и невесомых дозах. И в этом случае неоценимую услугу оказал метод меченых атомов. Частично мы уже касались данного вопроса в первом сообщении (Семенов, 1957); более подробно эти исследования будут изложены в последующих работах.

Следует заметить, что успешному разрешению данной проблемы препятствует ряд порой непреодолимых трудностей. Для правильной интерпретации получаемых результатов нам необходимы точные знания как обмена исследуемого комплексона в организме, так и ряда его физико-химических констант. Подобные сведения, однако, в большинстве случаев отсутствуют в литературе. Это обстоятельство также весьма затрудняет выбор комплексона, подходящего для решения данного конкретного вопроса, и вынуждает экспериментатора значительную часть времени уделять поисковым опытам.

Для решения этой важной проблемы необходимо тесное сотрудничество биофизиков, физико-химиков и биохимиков. Лишь такое объединение усилий ученых различных профилей позволит устранить указанные пробелы, обеспечит достаточно широкий охват самых различных групп комплексонов в изучении влияния их на поведение инкорпорированных металлов. Систематизация и обобщение полученных результатов дадут возможность вывести ряд закономерностей, которые, можно надеяться, приведут к объяснению тончайших механизмов, участвующих в сложных процессах минерального обмена.

Столь широкий охват комплексонов имеет и огромное практическое значение: сопоставление их эффективности в выведении из организма излучателей и токсических металлов позволит направить дальнейшие исследования в этой области по наиболее рациональному пути и даст возможность терапевту выбрать для каждого отдельного случая подходящий комплексон. Настоящее сообщение посвящено сравнению эффективности различных комплексонов, изученных в нашей лаборатории, а также другими исследователями. Мы рассмотрим лишь те комплексоны, относительно которых имеются точные количественные данные.

МЕТОДИКА

Опыты проводились на белых лабораторных крысах. Методика введения крысам радиоактивных препаратов и комплексонов была описана ранее (Семенов, Трегубенко, 1957). Поэтому необходимо остановиться лишь на способе выражения содержания излучателей в органах, принятом нами в интересах унификации излагаемого материала. Если данные были взяты из работ иностранных авторов, то в приводимые ими величины вносилась поправка соответственно с нашим контролем. Если между данными по контрольным группам животных в отдельных опытах имелись некоторые различия, эти данные пересчитывались на усредненный контроль.

РЕЗУЛЬТАТЫ ОПЫТОВ

Обычно, испытывая новый комплексон, мы применяли его сперва в ранние сроки после инкорпорации излучателя; комплексоны, оказавшиеся эффективными и вместе с тем малотоксичными, апробировались так-

же и на поздних стадиях опыта. В связи с этим число представленных в последнем случае комплексонов ограничено.

При сравнении эффективности различных комплексонов мы остановимся лишь на основных органах депо (скелет и печень или тушка), причем в случае статистически реальных отклонений от контроля будут приведены соответствующие величины вероятности *P*, вычисленные по методу Стюдента при помощи критерия *t*.

Стронций. Как видно из рис. 1, цитрат натрия, цитрат кальция и гексаметафосфат (ГМФ), введенные вскоре после инкорпорации радиостронция, препятствуют отложению его в скелете. Наибольший эффект

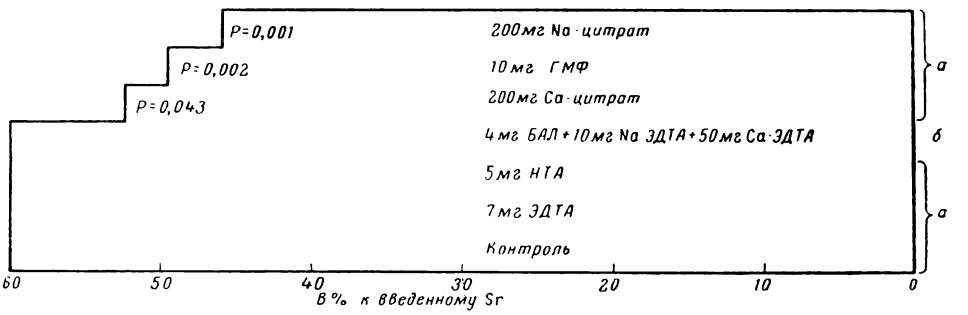


Рис. 1. Влияние различных комплексонов на отложение радиостронция в скелете крыс (по данным: *а* — Трегубенко, Будко, Пани и Семенова, 1952; *б* — Кона и Гонга, 1953)

при этом оказывает цитрат натрия, снижающий отложение излучателя на 14%. Остальные комплексоны: этилендиаминтетраацетат (ЭДТА), нитрилотриацетат (НТА), а также, по данным Кона и Гонга (Cohn, Gong, 1953), комбинация димеркаптопропанола (БАЛ) с ЭДТА не оказывают никакого влияния на поведение стронция.

Позднее применение цитрата (однократная инъекция через три дня после инкорпорации стронция), по данным Шуберта и Уоллэса (Schubert a. Wallace, 1950), не повышает выделения излучателя. По нашим данным (Семенов, 1953), даже многократное (по 50 мг в течение 10 дней) введение цитрата, начиная со второго дня опыта, не снизило содержания стронция в скелете крысы (рис. 2). Не оправдались надежды и на возможность выведения стронция путем многократной декальцинации скелета натриевой солью ЭДТА: наблюдаемое в трех опытах меньшее содержание излучателя в скелете статистически недостоверно, так же как и некоторое повышение содержания его в 4-м опыте. Неэффективными оказались также тиосульфат натрия и комбинация паратиреокрина с ЭДТА (Семенов, 1953). Только триметафосфат натрия дал заметное и статистически вполне достоверное снижение содержания радиостронция в костной ткани (Трегубенко и Семенов, 1960).

Иттрий. Влияние различных комплексонов на выделение с мочой радиоиттрия, введенного внутривенно незадолго (2—5 мин.) до этого, представлено в табл. 1.

Из приведенных данных видно, что ГМФ и НТА примерно вдвое менее эффективны, чем ЭДТА, а цитрат оказывает едва заметный эффект.

С остальными испытанными в нашей лаборатории комплексонами не проводилось обменных опытов; поэтому мы лишены возможности сравнить их эффективность по выделению радиоиттрия с мочой. Однако данные, касающиеся отложения излучателя в основных органах-депо, с достаточной ясностью отображают способность того или иного комплексона воздействовать на поведение радиоиттрия в организме, поскольку при этом не наблю-

дается заметного «перекачивания» радиоактивности в другие органы и ткани.

Из рис. 3 видно, что, помимо вышеописанных, к эффективным в отношении радиоиттрия комплексонам следует отнести также ортофосфат натрия, который, хотя и повышает отложение излучателя в печени с 9 до 17%, вдвое снижает отложение его в скелете, что значительно более существенно, так как из печени иттрий выделяется довольно быстро (Трегубенко и Семенов, 1960).

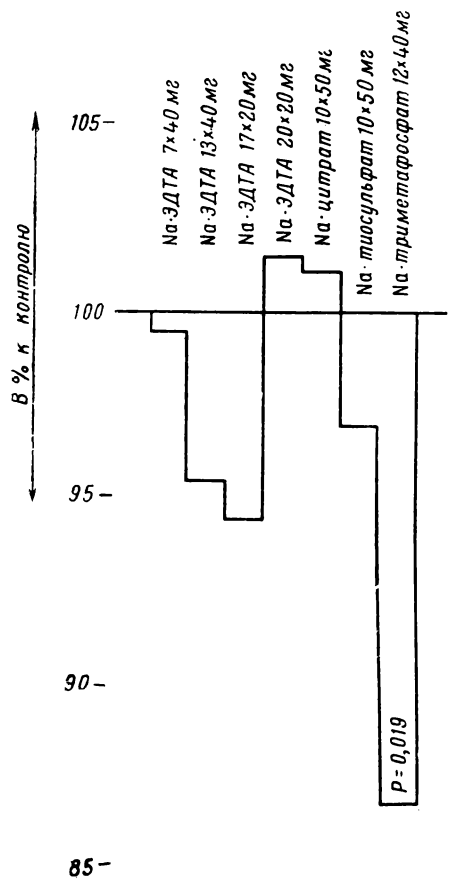


Рис. 2. Влияние позднего (со 2-го или 5-го дня после введения Sr) многократного применения комплексонов на содержание радиостронция в скелете крыс (по данным Д. И. Семенова, 1953)

Остальные препараты или не влияют на отложение иттрия в органах, как, например, бикарбонат или тиосульфат натрия, или же, снижая на 7% отложение излучателя в скелете, повышают на 12% захват его печенью (фосфат аммония); такое повышение отложения иттрия в печени вызывают, как видно из рис. 3, все фосфаты, включая и ГМФ. Цитрат, по данным Шуберта (1949), значительно усиливает отложение иттрия в костной ткани.

При позднем длительном применении НТА оказал значительно менее выраженный эффект, чем Na ЭДТА и Ca ЭДТА (рис. 4).

Подытоживая результаты испытаний различных комплексонов в отношении влияния их на поведение инкорпорированного радиоиттрия, необходимо остановиться на следующих основных моментах. Наиболее выраженный общий эффект (снижение отложения излучателя в тканях и повышение выделения его из организма) оказывает ЭДТА. Другой представитель группы азотсодержащих поликарбоксильных кислот — НТА — даже в утроенных по молярности дозах вызывает вдвое меньший общий эффект, что обусловлено в основном значительно менее выраженным снижением отложения радиоиттрия в костной ткани, нежели под влиянием ЭДТА. Фосфаты, как правило, повышают отложение иттрия в печени и остальных мягких тканях.

В отношении депонирования излучателя в скелете наиболее выраженный эффект из всех испытанных фосфатов дает ГМФ; ортофосфат натрия и фосфат аммония оказались в этом отношении значительно менее действенными, несмотря на то, что они вводились в 5—7 раз больших по молярности дозах (рис. 3). Особенный интерес представляет тот факт, что фосфат аммония в отличие от ортофосфата натрия не вызывает статистически достоверного снижения отложения радиоиттрия в костной ткани.

Повышенное отложение иттрия в костной ткани под влиянием цитрата наводит на мысль, что этот биокомплексон, присутствующий в орга-

Таблица 1

Влияние раннего применения комплексонов на выделение иттрия с мочой у крыс в течение первых суток опыта

Комплексон	Выделено Y с мочой (в %)	Ссылка на литературу
ЭДТА	80	Семенов, Борисова, 1951
ГМФ	50	Семенов, 1952
НТА	40	Трегубенко и сотрудники, 1952
Цитрат	25* (31)	
Контроль . . .	20 (25)	Schubert, 1949,

* Коррегировано на наш контроль; в скобках — данные Шуберта по выделению цитрата иттрия.

низме в норме, в значительной степени ответствен за высокое отложение излучателя в скелете.

Церий. Из данных рис. 5 видно, что ГМФ и триметафосфат наиболее выраженно снижают отложение радиоцерия в скелете и печени. Остальные фосфаты оказывают меньший эффект на отложение церия

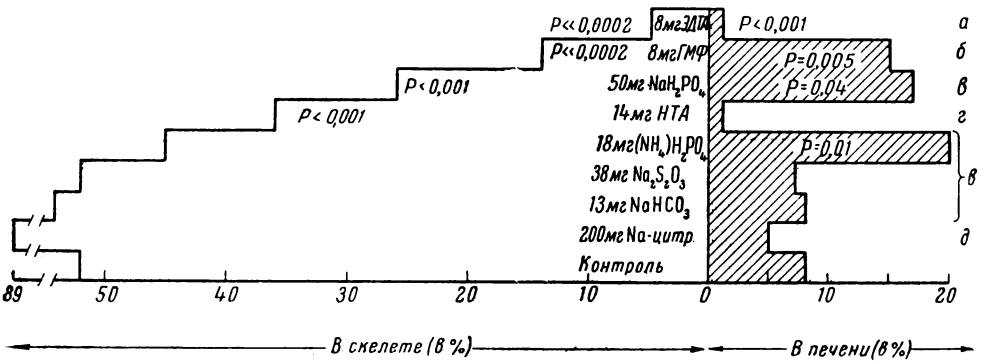


Рис. 3. Влияние различных комплексонов на отложение радиоиттрия в скелете и печени крыс (по данным: *а*—Семенова и Борисовой, 1951; *б*—Семенова, 1952; *в*—по неопубликованным данным; *г* — Трегубенко, Будко, Пани и Семенова, 1952; *д* — Шуберта, 1949)

в костной ткани и практически не влияют, за исключением триполифосфата, на отложение излучателя в печени. ЭДТА и НТА, резко снижая депонирование радиоцерия в печени, значительно увеличивают отложение его в скелете. Высокоэффективным в отношении церия оказался цитрат натрия, вызывающий почти столь же выраженное снижение отложения излучателя в печени и в скелете, как ГМФ и триметафосфат.

Существенный интерес представляло бы испытание эффективности фосфатов, и в особенности триметафосфата, на поздних после инкорпорации церия стадиях опыта. Это дало бы возможность сравнить полученные данные с имеющимися у нас данными по ЭДТА (Семенов и Трегубенко, 1957).

Свинец. Несмотря на то, что отравления свинцом занимают в промышленной токсикологии видное место, в литературе мало точных количественных исследований как по предотвращению отложения этого

металла в тканях, так и по ускорению выведения его из организма. Этим в основном и объясняется тот факт, что для лечения свинцовых отравлений уже 15 лет применяют лимоннокислый натр, несмотря на то, что,

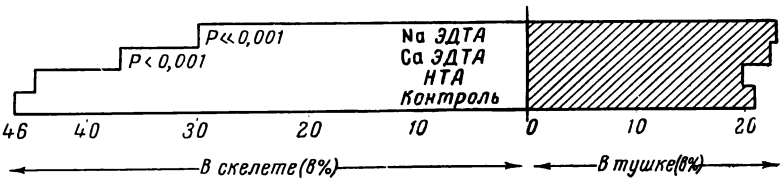


Рис. 4. Влияние позднего (начиная со 2-го дня после введения иттрия) применения комплексонов (15 дней по 20 *мг*) на содержание радиоиттрия в скелете и тушке крыс (по данным Семенова, 1953)

как показали Шуберт и Уайт (Schubert, White, 1952) в опытах с меченым свинцом, это соединение вообще не оказывает никакого влияния на поведение свинца в организме. Благоприятное влияние другого комплексона, БАЛ, по которому также нет точных данных в отношении свинца, оспаривается большинством авторов.

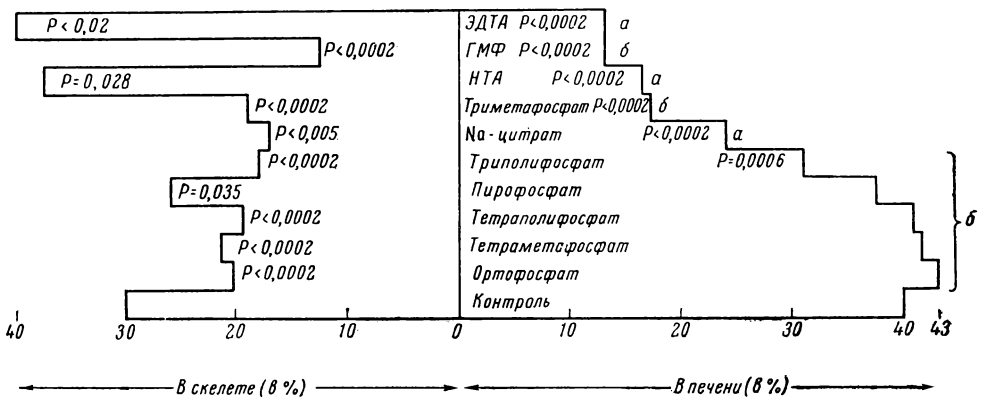


Рис. 5. Влияние различных комплексонов на отложение радиоцерия в скелете и печени крыс. Все комплексоны вводились внутривенно через 2 минуты после излучателя (цитрат — внутрибрюшинно, 200 *мг*) в дозах: фосфаты — 10 *мг*, ЭДТА — 7 *мг*, НТА — 5 *мг* (по данным: *а*—Трегубенко, Будко, Пани и Семенова, 1952; *б*—Будко, Трегубенко, Пани и Кача, 1952)

Нами изучалось влияние ЭДТА и ГМФ на отложение радиосвинца в органах крысы (Семенов, 1952 б, в). Для сравнения приводим данные Шуберта по цитрату натрия. Как видно из рис. 6, ЭДТА в значительно большей степени предотвращает отложение свинца в скелете и мягких органах, чем ГМФ; цитрат практически не оказывает никакого влияния.

В связи с высокой эффективностью ЭДТА данное соединение в настоящее время широко используется в ряде заграничных клиник для лечения свинцовых отравлений как в острой, так и хронической стадиях заболевания.

Плутоний. Обстоятельные исследования по влиянию различных комплексонов на поведение плутония в организме крысы (Трегубенко, 1955), результаты которых сведены на рис. 7, показывают, что наиболее эффективны в предотвращении отложения излучателя в скелете ГМФ и ЭДТА. При этом, как и в отношении церия, ГМФ оказывает более выраженное влияние на отложение плутония в скелете, нежели ЭДТА.

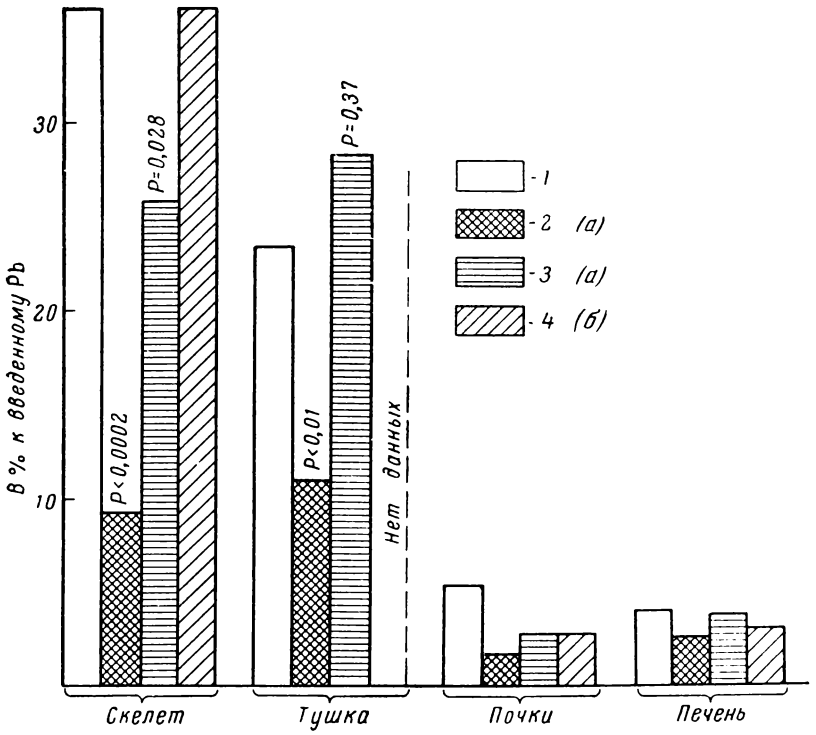


Рис. 6. Влияние различных комплексонов на отложение радиосвинца в тканях крыс (по данным: *а*—Семенова, 1952; *б*—Шуберта и Уайта, 1952); *1* — контроль· *2* — ЭДТА; *3* — ГМФ; *4* — цитрат.

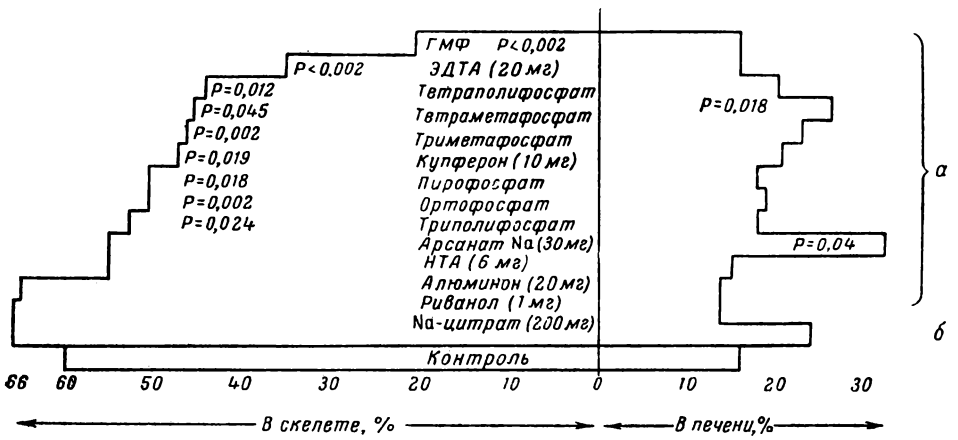


Рис. 7. Влияние различных комплексонов на отложение плутония в скелете и печени крыс. Все препараты вводились через 10 мин. после инкорпорации плутония (цитрат — через 30 мин.) в указанных на рис. дозах (фосфаты — по 10 мг) (по данным: *а*– Трегубенко, 1955; *б*—Шуберта, 1949)

Значительно менее эффективными оказались остальные комплексоны из группы фосфатов, а тетраметафосфат даже повысил статистически достоверно отложение плутония в печени. Интересно отметить, что НТА практически не влияет на поведение плутония в организме; некоторое снижение депонирования излучателя в скелете статистически нереально. Вероятно, это обусловлено тем, что НТА, дающий 3-зарядные анионы, не способен образовывать комплексные соединения с 4-валентным плутонием.

Другие испытанные комплексоны (арсанат натрия, алюминон, риванол), о которых известно, что они дают с плутонием растворимые в воде комплексные соединения (Seaborg a. oth., 1948), не оказали достоверного влияния на отложение излучателя в основных органах-депо, за исключением арсаната натрия, статистически реально повысившего отложение плутония в печени.

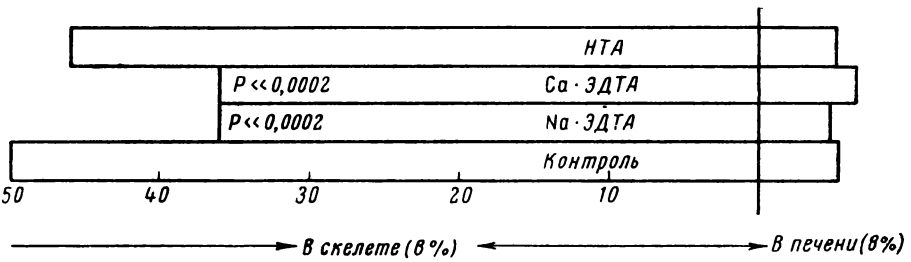


Рис. 8. Влияние позднего (со 2-го по 21-й день после введения плутония) применения комплексонов на содержание плутония в скелете и печени крыс (по данным Трегубенко, 1955)

Следует отметить, что купферон, дающий с металлами нерастворимые комплексные соединения, снизил отложение плутония в скелете.

Приводимые для сравнения данные Шуберта (1949) по цитрату указывают на некоторое повышение депонирования плутония в скелете и печени под его влиянием, однако отсутствие исходного цифрового материала в цитируемой работе не позволяет судить о реальности этих отклонений.

В общем, как видно из рис. 7, ни один из испытанных комплексонов не в состоянии снизить отложение плутония в печени [1]. Меньшие же дозы фосфатов, как было показано в предыдущем сообщении, даже повышают захват этого излучателя мягкими органами. Возможно, что большие дозы комплексонов способны снизить отложение плутония в печени, однако ввиду высокой токсичности большинства фосфатов этот вопрос нами не изучался. Вместе с тем, все испытанные комплексоны, за исключением цитрата, риванола и алюминона, вызывали более или менее выраженное снижение отложения плутония в скелете. Данное обстоятельство приобретает важное значение для предупреждения отравлений этим опасным излучателем, если учесть, что плутоний практически не выделяется из костной ткани.

Сравнение эффективности комплексонов в выведении уже отложившегося в тканях плутония мы можем сделать лишь на основании данных по Na ЭДТА, CA ЭДТА и НТА (Трегубенко, 1955), так как другие комплексоны не исследовались в этом направлении. Как видно из рис. 8, ежедневные инъекции по 20 мг Na ЭДТА со 2-го по 21-й день опыта мобилизуют из скелета около 14% введенного в организм плутония, снижая содержание его с 50 до 36%. Такой же эффект вызвал и Ca ЭДТА, в то время как НТА дал статистически недостоверное снижение

[1] По данным одного из авторов (Трегубенко, 1955), это касается также и других мягких органов.

содержания излучателя в скелете. На содержание плутония в печени и других мягких тканях (почки, селезенка) ни один из этих комплексонов не оказал статистически достоверного влияния.

ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ

Сравнение влияния различных комплексонов на поведение металлов в организме представляет существенный интерес. Оно дает, в частности, возможность избрать наиболее эффективный препарат для лечения отравления тем или иным излучателем или токсическим металлом, а также направить дальнейшие поиски по наиболее рациональному пути.

Особенно важно такое сравнение с теоретической точки зрения, причем здесь существенный интерес представляет не только наличие, но и отсутствие эффекта у комплексона, который в условиях пробирки дает комплексные соединения с исследуемым катионом. Последнее, с одной стороны, указывает на специфику живого организма, а с другой, если речь идет о биокомплексоне, позволяет исключить его из списка соединений, принимающих участие в обмене данного металла в организме. Сопоставление же влияния эффективных комплексонов позволяет выявить как количественные, так и качественные различия в их действии, что дает возможность глубже изучить физико-химические механизмы процессов, происходящих в организме.

На примере иттрия и свинца мы видели, что эффективность выше у тех комплексонов, которые обладают бóльшим сродством к данному металлу: чем устойчивее образуемый комплекс, тем сильнее выражен эффект. Этот факт весьма существен. Он свидетельствует о том, что в организме продолжают действовать физико-химические закономерности, установленные в пробирочных опытах, а также дает нам возможность, количественно выразив данную закономерность (например, степень повышения выделения излучателя из органов под воздействием комплексонов, дающих с этим излучателем различные по устойчивости комплексные соединения), судить об устойчивости связей исследуемого металла с клеточными структурами и биокомплексонами в организме.

По-иному проявляется значение констант устойчивости комплексов в опытах со стронцием. Здесь благодаря рассмотренному в первом сообщении (Семенов, 1957) «кальциевому фону» в крови степень эффективности комплексона определяется не величиной константы устойчивости его комплекса со стронцием, а отношением этой величины к константе устойчивости его комплекса с кальцием, т. е., другими словами, константой вытеснения кальция радиостронцием. Таким образом, на основании данных, полученных в опытах с иттрием, свинцом и стронцием, в качестве общего положения можно принять, что влияние комплексонов на поведение инкорпорированных излучателей растет с увеличением константы вытеснения кальция из комплексных соединений данным излучателем (катионом). Ввиду этого эффективными в отношении стронция оказались те комплексоны (цитрат, фосфаты), которые образуют со стронцием и кальцием близкие по устойчивости соединения, тогда как значительно более мощные комплексоны (ЭДТА, НТА), у которых, однако, константа устойчивости комплексов со стронцием на 1,5—2 порядка величин ниже, чем с кальцием, не дали эффекта.

Специальный интерес представляет то обстоятельство, что ЭДТА и НТА способствуют отложению, а фосфаты и цитрат, наоборот, снижают отложение церия в скелете. Любопытно также, что ГМФ, менее эффективный в отношении иттрия и свинца, оказывает большее влияние, чем ЭДТА и НТА, на поведение церия и плутония. Объяснить эти качественные различия пока не представляется возможным, однако нам

кажется, что исследование причин указанных различий в значительной мере углубит и детализирует наши представления о процессах минерального обмена в организме. Изложенные здесь факты и соображения должны стимулировать расширение подобных исследований с привлечением новых комплексонов и излучателей, а также изучение судьбы инкорпорированных комплексонов. Замечательно полные и точные данные по обмену Са ЭДТА, меченного радиоуглеродом, полученные Форманом и сотрудниками (Foreman a. oth., 1953, 1954), представляют собой образец исследований такого рода. В настоящее время мы еще слишком далеки от того, чтобы делать количественные выводы из сравнения эффективности различных комплексонов. Для установления количественных закономерностей необходимо подобрать комплексоны, отличающиеся лишь константами устойчивости образуемых ими комплексных соединений, но аналогичные или же весьма сходные по всем прочим показателям.

В первую очередь следует обратить внимание на судьбу испытуемого комплексона в организме. Нам известно, что лимонная кислота, ГМФ, три- и тетраполифосфаты подвергаются расщеплению в тканях. Уже это обстоятельство не дает нам права делать количественные выводы в отношении значения величин констант устойчивости комплексных соединений из непосредственного сравнения эффективности этих препаратов и таких комплексонов, как ЭДТА, который не подвергается изменениям в условиях организма. Однако простая констатация факта, что данный комплексон расщепляется при введении в организм, не может нас удовлетворить, так как вполне вероятно, что большинство препаратов, подходящих по константам устойчивости образуемых ими комплексных соединений, будет в той или иной мере подвергаться расщеплению в тканях. Поэтому весьма желательно знать скорость этого процесса, а также продукты расщепления и их судьбу. Это дало бы возможность в случае заметного расщепления комплексона в течение срока исследования внести соответствующую поправку в установленную эффективность. Конечно, в данном случае во избежание неправильных выводов необходимо принять во внимание возможность наличия комплексующих свойств у продуктов расщепления данного комплексона.

Среди других факторов, которые следует учитывать при сравнении эффективности различных комплексонов, необходимо указать на степень ионизации их в условиях организма, скорость образования данного комплексного соединения, а также скорость выделения его из организма и наличие афинитета к той или иной ткани.

Изложенные здесь соображения свидетельствуют о больших трудностях в выяснении участия и роли комплексонов в минеральном обмене и, в частности, значения констант устойчивости образуемых ими соединений в определении взаимоотношений между катионами и биокомплексонами. Успешное решение этих проблем возможно лишь на базе точного количественного учета всех физико-химических констант (устойчивость и скорость образования комплексов, степень их ионизации при данном pH, конкурентные взаимоотношения с другими катионами и биокомплексонами), а также специфики живого организма (степень проникновения комплексона в ткани и афинитет к ним, расщепление и скорость выделения комплексона из организма, наконец, наличие сорбирующих поверхностей, фагоцитирующих клеток и пр.).

ВЫВОДЫ

1. Из исследованных комплексонов в предотвращении отложения в органах и тканях инкорпорированных иттрия и свинца наиболее эффективен ЭДТА. Натриевая форма данного комплексона наиболее дей-

ственна в смысле мобилизации указанных металлов из костной ткани.

2. Отложению в органах радиоцерия и плутония в наибольшей степени препятствует ГМФ. При этом в отличие от ЭДТА и НТА, которые несколько повышают отложение церия в костной ткани, ГМФ и прочие фосфаты снижают отложение этого металла в скелете.

3. Из всех испытанных комплексонов только цитрат и фосфаты снижают отложение в скелете радиостронция. Триметафосфат, примененный на поздних стадиях опыта, заметно ускоряет выделение радиостронция из костной ткани, в то время как цитрат не дает эффекта.

4. Влияние комплексонов на поведение инкорпорированных металлов растет с увеличением константы вытеснения кальция из комплексных соединений данным катионом.

5. Наблюдаемые различия в действии комплексонов на поведение инкорпорированного катиона могут быть поняты и объяснены только при строгом учете всех физико-химических констант испытуемых комплексонов и специфики живого организма.

6. Выяснение закономерностей влияния комплексонов на поведение металлов в организме даст возможность глубже вникнуть в процессы минерального обмена.

ЛИТЕРАТУРА

Будко Л. Н., Трегубенко И. П., Пани Г. Э. и Кач А. З. Предварительные опыты по влиянию различных фосфатов на поведение церия в организме. Отчет за 1952 г. Фонды УФАН СССР.

Семенов Д. И. Влияние ГМФ на поведение иттрия в организме. Отчет за 1952 г. Фонды УФАН СССР.

Семенов Д. И. Влияние ЭДТА на поведение свинца и висмута в организме. Отчет за 1952 г. Фонды УФАН СССР.

Семенов Д. И. Влияние ГМФ на поведение свинца и висмута в организме. Отчет за 1952 г. Фонды УФАН СССР.

Семенов Д. И. Эффективность комплексонов при позднем длительном применении их в опытах по выведению излучателей из организма. Отчет за 1953 г. Фонды УФАН СССР.

Семенов Д. И. Влияние комплексонов на поведение металлов и излучателей в организме. I. Механизм действия комплексонов. УФАН, Тр. Ин-та биол., вып. 9, 1957.

Семенов Д. И., Борисова Н. Д. Влияние этилендиаминтетраацетата натрия на поведение иттрия в организме. Отчет за 1951 г. Фонды УФАН СССР.

Семенов Д. И., Трегубенко И. П. Влияние комплексонов на поведение металлов и излучателей в организме. II. Этилендиаминтетраацетат. УФАН СССР. Тр. Ин-та биол., вып. 9, 1957.

Трегубенко И. П. Распределение плутония в организме и методы экспериментального воздействия на темп его выделения. Диссертация, 1955. М., Ин-т биофиз. АМН СССР.

Трегубенко И. П., Будко Л. Н., Пани Г. Э и Семенов Д. И. Дополнительные опыты по выведению радиоактивных изотопов из организма. Отчет за 1952 г. Фонды УФАН СССР.

Трегубенко И. П. и Семенов Д. И. Влияние комплексонов на поведение металлов и излучателей в организме. III. Фосфаты. Статья в наст. сборнике.

Cohn S. H., Gong J. K. Effekt of chemical agents on skeletal content and excretion of injected Strontium-89. Proc. Soc. Exp. Biol. a. Med., 1953, **83**, 550.

Foreman H., Trujillo Th. The metabolism of C^{14}-labeled ethylenediaminetetraacetic acid in human beings. J. Lab. a. Clin. Med., 1954, **43**, 566.

Foreman H., Vier M., Magee M. The metabolism of C^{14}-labeled ethylenediaminetetraacetic acid in the rat. J. Biol. Chem., 1953, **203**, 1045.

Schubert J. An experimental study of the effect of zirconium and sodium citrate treatment on the metabolism of plutonium and radioyttrium. J. Lab. a. Clin. Med., 1949, **34**, 313.

Schubert J., Wallace H. The effect of zirconium and sodium citrate on the distribution and excretion of simultaniously injected thorium and radiostrontium. J. Biol. Chem., 1950, **157**, 183.

Schubert J., White M. R. Effect of sodium and zirconium citrate on distribution and excretion of injected radiolead. J. Lab. a. Clin. Med., 1952, **39**, 260.

Seaborg G. T., Katz J., Manning W. M. The transuranium elements. N. Y., 1948.

АКАДЕМИЯ НАУК СССР
УРАЛЬСКИЙ ФИЛИАЛ

Вып. 12 ТРУДЫ ИНСТИТУТА БИОЛОГИИ 1960

В. Г. КУЛИКОВА

ВЛИЯНИЕ ИНКОРПОРИРОВАННОГО ЦЕРИЯ-144 НА ПЛОДОВИТОСТЬ МЫШЕЙ И РАЗВИТИЕ ИХ ПОТОМСТВА

ВВЕДЕНИЕ

В радиобиологической литературе накопилось большое количество данных о влиянии ионизирующих излучений на плодовитость животных. Особенно широко представлен материал по влиянию на плодовитость облучения извне; количество же работ по действию инкорпорированных радиоактивных веществ на плодовитость весьма ограничено. В доступной нам литературе имеются работы лишь с радиойодом (Duffy, Codwin, Trunnel a. Rauson, 1950; Tillotson a. Rose, 1953; Rugh, 1953) и радиофосфором (Sikov a. Noonan, 1954). Интерес к этим излучателям продиктован широким применением их в клинической практике.

Между тем, использование изотопов в исследовательских целях и народном хозяйстве настоятельно требует всестороннего изучения действия на организм самых различных излучателей.

Наши исследования посвящены изучению влияния на плодовитость животных инкорпорированного церия-144. Данный излучатель выбран не случайно. Церий со своим дочерним продуктом — празеодимом — является основной составной частью (от 60 до 65%) выдержанного неразделенного раствора осколков урана. Поведение церия в организме характеризуется высоким накоплением его в печени (до 60%) и скелете (до 30%); содержание церия в половых железах незначительно (0,3%).

Исходя из данных нашей лаборатории по токсикологии радиоцерия, мы избрали для проведения настоящих опытов такие дозы излучателя, которые, с одной стороны, оказали бы явный эффект, а с другой, не вызывали бы гибели животных в ранние сроки после инкорпорации. Такая постановка опыта давала возможность проследить воспроизводительную способность подопытных животных, особенности лактационного периода, а также определить количество излучателя, передаваемого потомству через плаценту и молоко.

Более полное представление дало бы сравнительное изучение действия различных доз излучателей. Однако ввиду громоздкости подобных опытов мы остановились лишь на двух дозах: 0,5 и 1,25 μ Cu на 1 г живого весса мышей, соответствующих ЛД 50/160 и ЛД 50/80. Помимо того, нами исследовались чувствительность полученного от подопытных животных потомства к облучению радиоактивным кобальтом (Co^{60}).

МАТЕРИАЛ И МЕТОДИКА

Подопытным материалом служили белые лабораторные мыши обоего пола в возрасте от 2 до 2,5 месяца, весом около 20 г. В опыт было взято 863 мыши, из которых 582 вводился внутрибрюшинно 0,25 мл раствора, содержащего церий-144 в дозах 0,5 или 1,25 мккюри на 1 г веса животного; остальные мыши служили контролем. Все мыши были распределены на восемь вариантов; в четырех из них, составивших «размножаемую группу», производилось скрещивание самок с самцами в разных комбинациях; остальные четыре варианта составили «неразмножаемую группу». Схема опыта представлена в табл. 1.

Таблица 1

Схема опыта

Группы	Вариант	Количество мышей		Доза церия -144 на 1 г веса животного (в мккюри)	
		1-й опыт	2-й опыт	1-й опыт	2-й опыт
Размножаемые	1 ♀ × ♂	32	48		
		8	12		
	2 ♀ × ♂	32	48	0,5	1,25
		8	12	0,5	1,25
	3 ♀ × ♂	32	48	0,5	1,25
		8	12		
	4 ♀ × ♂	32	48		
		8	12	0,5	1,25
Неразмножаемые	5 ♀	161	141	0,5	1,25
	6 ♂	37	54	0,5	1,25
	7 ♀	10	34		
	8 ♂	10	16		

Примечание. ♀♂ контрольные самки и самцы; ♀♂ самки и самцы, которым инкорпорировался церий.

Испытание на плодовитость при меньшей дозе излучателя производилось трижды: на 14-й день после инкорпорации радиоцерия, т. е. когда, по нашим данным, в организме мышей осталось 50% введенного излучателя, а также в более отдаленные сроки — на 110-й и 150-й дни. В опыте с большей дозой радиоцерия животные испытывались на плодовитость только один раз — через 21 день после введения излучателя.

После 15-дневного совместного пребывания самцов с самками первых удаляли из гнезд и в дальнейшем вели регистрацию всех случаев беременности и окота. Высчитывали процент окотившихся и стерильных мышей, а также подсчитывали среднее число мышат в помете. В течение опыта вели наблюдения за изменением веса подопытных мышей, отмечали сроки их гибели.

Кроме того, определялось количество излучателя, переданного потомству от самок, которым инкорпорировался церий. Содержание изотопа у молодняка определялось в день рождения, при отъеме, на 80-й и 150-й дни жизни.

Проводились также наблюдения за постэмбриональным развитием потомства, мышат периодически взвешивали.

Часть потомства из различных вариантов опыта с малой дозой сравнивали по плодовитости с потомством контрольной группы. Такое сравнение производили дважды: в 2,5- и 4-месячном возрасте. При этом для большей достоверности результатов к каждой самке, полученной от вариантов 2 и 3 (см. табл. 1), подсаживали по одному контрольному самцу на пять дней, которого на следующую пятидневку заменяли другим, а к каждому самцу, полученному от этих вариантов, подсаживали одновременно по две контрольных самки.

Другая часть потомства мышей из вариантов опыта с малой дозой сравнивалась на радиочувствительность с потомством, полученным от контрольных животных. Сравнение радиочувствительности проводилось на мышах в возрасте 3 месяцев (облучение 600 *r* γ-лучами Co^{60}), а также в 4-месячном возрасте (облучение 700 *r* γ-лучами Co^{60}). За облученными животными вели систематические наблюдения, регистрировали их смертность.

РЕЗУЛЬТАТЫ ОПЫТОВ

Изменение веса мышей. Одним из показателей наступления беременности, ее хода, общего состояния животных являются изменения в весе. Взвешивали животных с момента подсадки самцов к самкам. На 19—25-й день после подсадки самцов наблюдался массовый окот мышей, отражением чего служит резкое падение веса самок размножаемой группы в эти сроки.

Изменения веса мышей, которым инкорпорировался церий в дозе 0,5 мккюри/г, приведены на рис. 1 и 2. Явные различия в весе между подопытными и контрольными животными в размножаемой группе наблюдаются после окота, в то время как в неразмножаемой группе — с самого начала.

Изменения веса мышей, которым инкорпорировался церий в дозе 1,25 мккюри/г, представлены на рис. 3—5. Различия в весе животных подопытных вариантов как размножаемых, так и неразмножаемых групп мышей выражены резче, чем при дозе 0,5 мккюри, и наблюдаются с самого начала взвешивания.

Воспроизводительная способность подопытных самок и самцов. Воспроизводительная способность мышей, получивших по 0,5 мккюри церия на 1 г веса, проверялась на ранней и поздней стадиях опыта. На ранней стадии (14-й день) плодовитость подопытных мышей, как видно из табл. 2, несколько превышает контрольную; статистическая обработка, однако, указывает на недостоверность этих различий. На поздних стадиях опыта плодовитость подопытных самок заметно снижается. Так, к 110-му дню плодовитость в обоих вариантах с подопытными самками составляла 60—70% против 90% в контрольном, а также в варианте, в котором контрольные самки скрещивались с подопытными самцами. Еще резче эти различия проявляются к 150-му дню и особенно в варианте, в котором подопытными являлись оба партнера. Воспроизводительная способность самцов на всем протяжении опыта не страдала, что видно из данных, представленных в табл. 2.

Доза в 1,25 мккюри/г уже к 21-му дню опыта вызвала резкое снижение плодовитости всех животных из опытных вариантов, особенно выраженное в том случае, когда оба партнера являлись подопытными. Следует заметить, что из трех забеременевших самок из варианта с обоими подопытными партнерами окотилась лишь одна, давшая пять мышат; две другие самки погибли примерно в середине срока беременности от интоксикации, наступившей вследствие внутриутробной гибели плодов.

Среднее количество мышат в помете во всех вариантах опыта при обеих дозах не отличалось статистически достоверно от контроля.

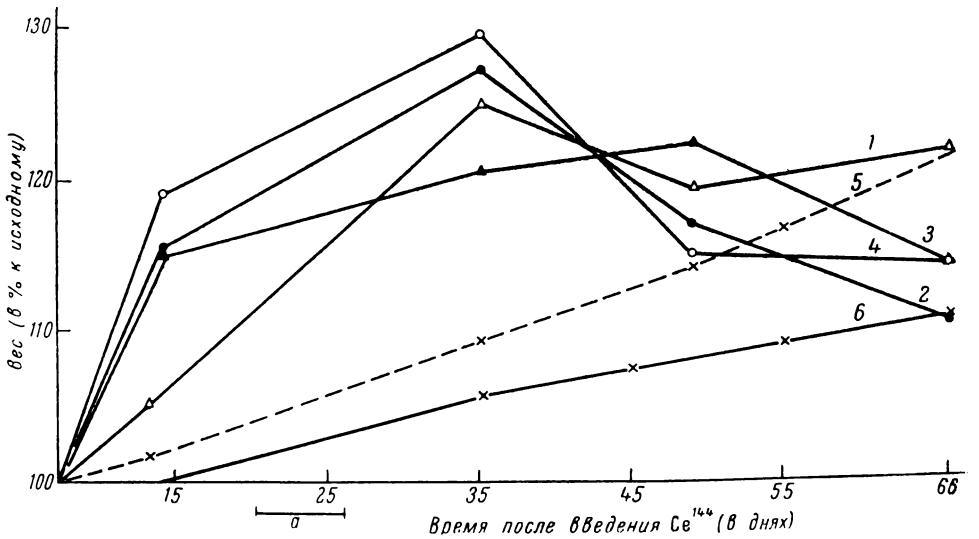


Рис. 1. Изменение веса беременных и небеременных самок после введения 0,5 *мккюри / г* церия

а — массовый окот мышей; *1*, *4* и *5* — контрольные самки из вариантов опытов: ♀ × ♂; ♀ × ♂ и ♀; *2*, *3* и *6* — подопытные самки из вариантов опытов: ♀ × ♂; ♀ × ♂ и ♀ (см. табл. 1)

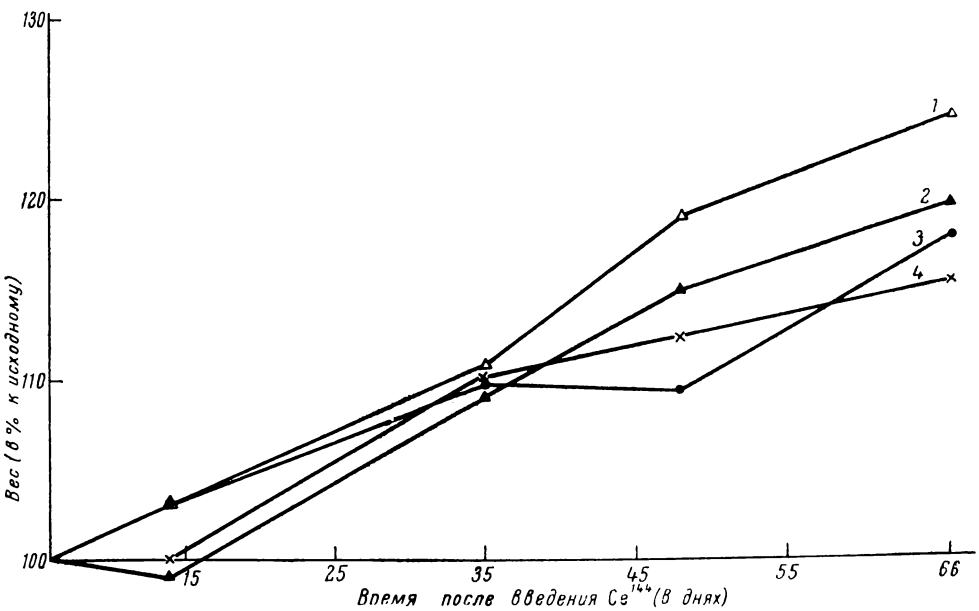


Рис. 2. Изменение веса контрольных и подопытных самцов после введения 0,5 *мккюри/г* церия

1 — контроль; *2*, *3* и *4* — подопытные самцы из вариантов опытов: ♀ × ♂; ♀ × ♂ и ♂ (см. табл. 1)

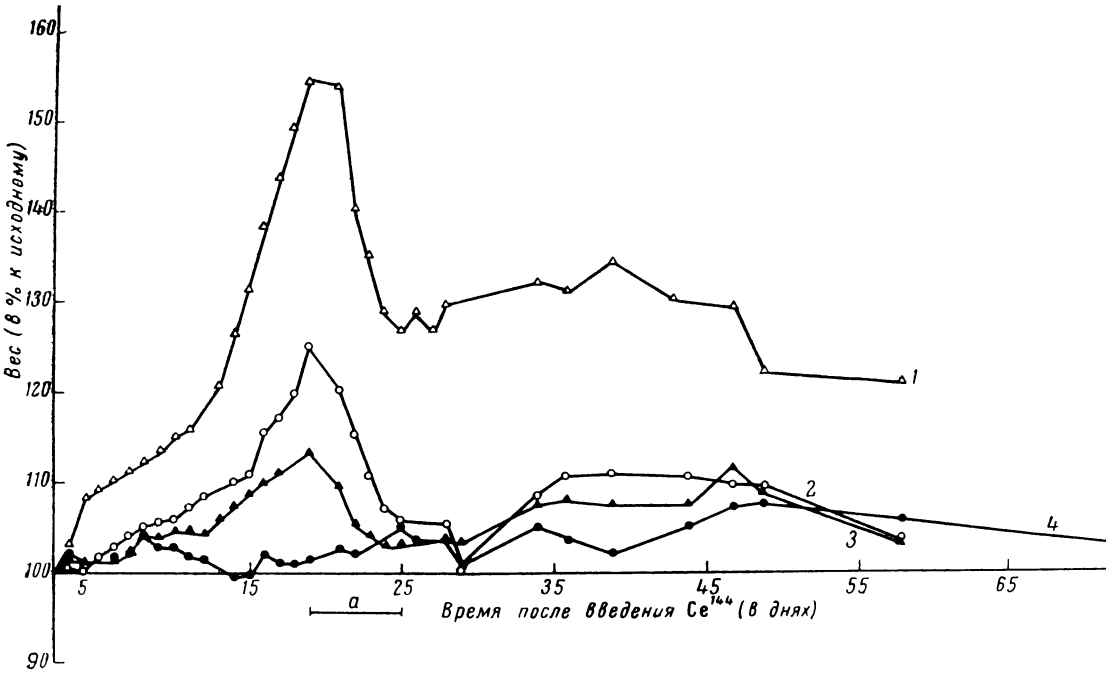


Рис. 3. Изменение веса беременных и небеременных самок после введения 1,25 *мккюри/г* церия

а — массовый окот мышей; *1* и *2* — контрольные самки из вариантов опытов: ♀×♂ и ♀×♂; *3* и *4* — подопытные самки из вариантов: ♀×♂ и ♀×♂ (см. табл. 1)

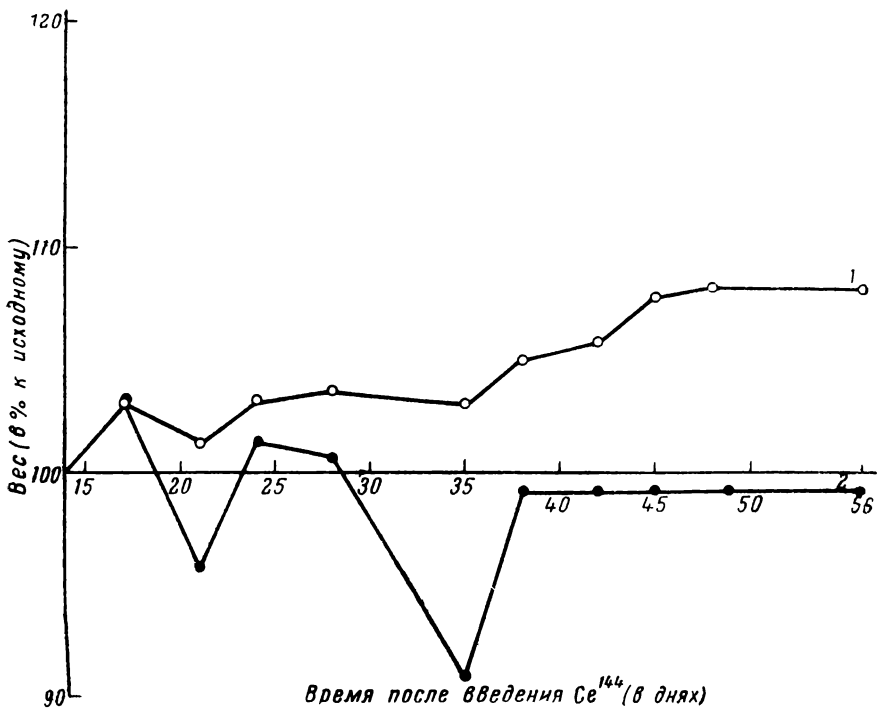


Рис. 4. Изменение веса контрольных и подопытных самцов после введения 1,25 *мккюри/г* церия с 14-го дня после начала опыта

1 — контроль; *2* — подопытные самцы

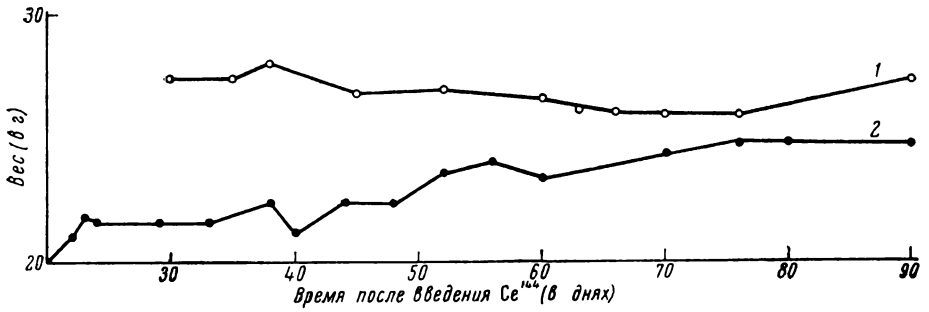


Рис. 5. Изменение веса контрольных и подопытных самок после введения 1,25 *мккюри/г* церия с 23-го дня после начала опыта

1 — контрольные самки; *2* — подопытные самки

Таблица 2

Плодовитость подопытных и контрольных мышей

Доза церия (мккюри/г)	Начало случки после введения церия (в днях)	Окот	Показатели	Варианты ♂ × ♂	♀ × ♂	♀ × ♂	♀ × ♂
0,5	14-й	1-й	Количество беременных / Количество исследованных	28/32	32/32	32/32	31/32
			% беременных	(87,5)	(100)	(100)	(96,8)
			Среднее количество мышат в помете	7,6	7,4	7,2	7,2
	110-й	2-й	Количество беременных / Количество исследованных	9/10	6/10	7/10	9/10
			% беременных	(90)	(60)	(70)	(90)
			Среднее количество мышат в помете	8,2	6,0	8,4	9,8
	150-й		Количество беременных / Количество исследованных	10/13	5/13	6/12	11/13
			% беременных	(77)	(38,4)	(50)	(84,5)
			Среднее количество мышат в помете	6,8	5,4	8,0	7,1
1,25	21-й	1-й	Количество беременных / Количество исследованных	44/48	3/48	10/48	22/48
			% беременных	(91,6)	(6,2)	(20,6)	(52,1)
			Среднее количество мышат в помете	6,9	5*	6,8	4,0

* Из трех беременных самок окотилась лишь одна.

Передача церия от родителей к потомству. Независимо от инкорпорированной матерям дозы детенышам передается не более чем по 0,03% введенного излучателя. Интересно отметить, что переданное потомству количество излучателя на протяжении всего срока наблюдения (150 дней) остается постоянным (табл. 3).

Таблица 3

Содержание церия-144 у потомства подопытных мышей (в % от введенного матерям количества)

Возраст потомства (в днях)	Доза церия-144 (в мккюри/г)		Потомство самцов, которым был инкорпорирован церий
	0,5	1,25	
Новорожденные	0,02 — 0,03 (10)	0,02 (8)	0
2-й	0,02 ± 0,004 (19)	0,03 ± 0,013 (18)	0
30-й	—	0,02 ± 0,003 (7)	0
40-й	0,03 ± 0,007	—	0
80-й	0,02 ± 0,0002	—	—
150-й	0,02 ± 0,007 (4)	—	—

Примечание: В скобках — количество исследованных мышат

Постэмбриональное развитие потомства. Независимо от дозы излучателя, введенной одному из родителей или обоим родителям, развитие мышат шло вполне нормально. В течение опыта не наблюдалось ни одного случая заболевания или самопроизвольной гибели среди подопытных или контрольных мышат; подопытный молодняк прибавлял в весе наравне с контролем (рис. 6 и 7).

Плодовитость потомства подопытных мышей. При испытании на плодовитость самок и самцов первого поколения, полученных от подопытных мышей из двух вариантов (табл. 4), не было обнаружено статистически достоверных отклонений от контроля.

Таблица 4

Плодовитость потомств подопытных мышей, которым излучатель был введен в дозе 0,5 мккюри/г

Варианты опыта, из которых взято потомство	Пол мышат	Мышата * в возрасте 2,5 мес.	Среднее число мышат в помете	Мышата в возрасте 4 мес.	Среднее число мышат в помете
1-й опыт (♀ × ♂)	♀ и ♂	8/8	9,1	7/7	8,1
2-й опыт (♀ × ♂ и ♀ × ♂)	♀	13/16	8,7	14/16	8,1
	♂	7/8	8,5	8/8	8,5

* В числителе указано количество плодовитых мышей, в знаменателе — общее количество исследованных животных.

Радиочувствительность потомства подопытных мышей. Потомство контрольных мышей, а также полученное из опыта с меньшей дозой излучателя подвергалось облучению γ-лучами Co^{60} в дозах 600 или 700 *r*.

Предварительная обработка полученных данных показала отсутствие достоверной разницы в радиочувствительности между потомством контрольной группы и молодняком, полученным от скрещивания контрольных самок и подопытных самцов. Поэтому эти группы объединены и приводятся на рисунках в качестве контроля. То же было проделано и

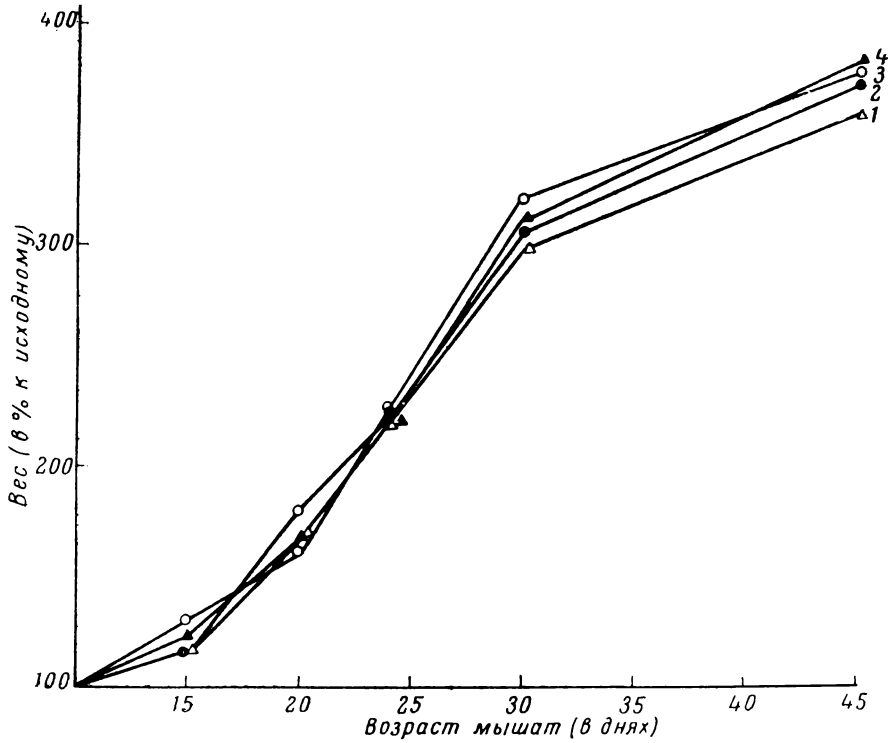


Рис. 6. Изменение веса потомства подопытных и контрольных мышей после введения 0,5 *мккюри/г* церия

1 — потомство контрольных мышей; *2*, *3* и *4* — потомство из вариантов опытов ♀×♂; ♀×♂ и ♀×♂ (см. табл. 1)

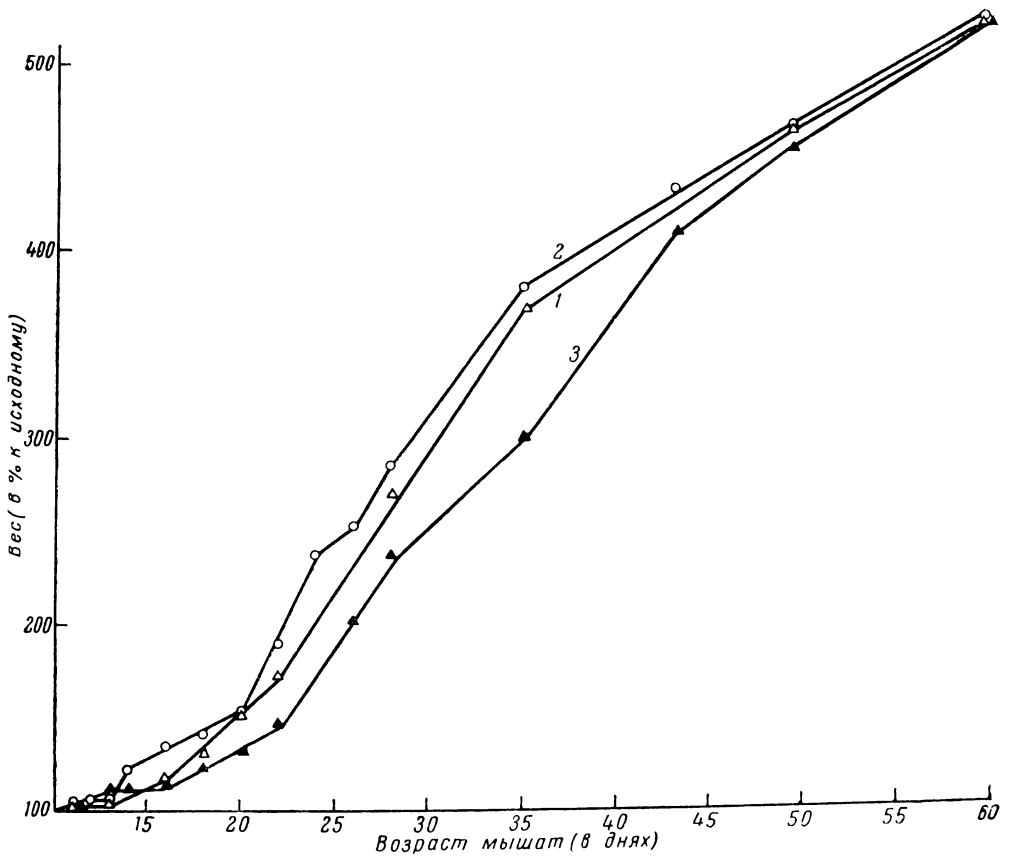


Рис. 7. Изменение веса потомства подопытных и контрольных мышей после введения 1,25 *мккюри/г* церия

1 — потомство контрольных мышей; *2* и *3* — потомство из вариантов опытов: ♀×♂ и ♀×♂ (см. табл.)

Таблица 5

Влияние облучения в период эмбрионального развития на смертность мышей от γ-облучения дозой 600 *r* в 3-месячном возрасте

Вариант опыта	Число мышей	Погибло к 30-му дню		Разница
		число	%	
Самки				
От подопытных матерей	48	13	27,1 ± 6,4	27,1 ± 9,6
От контрольных матерей	48	26	54,2 ± 7,2	
Самцы				
От подопытных матерей	48	36	75,0 ± 6,3	13,9 ± 7,8
От контрольных матерей	45	40	88,9 ± 4,7	

с остальными двумя подопытными вариантами, которые также показали при предварительной обработке одинаковую радиочувствительность.

В табл. 5 представлены результаты опыта с облучением 3-месячного потомства, полученного от контрольных и подопытных вариантов. Как

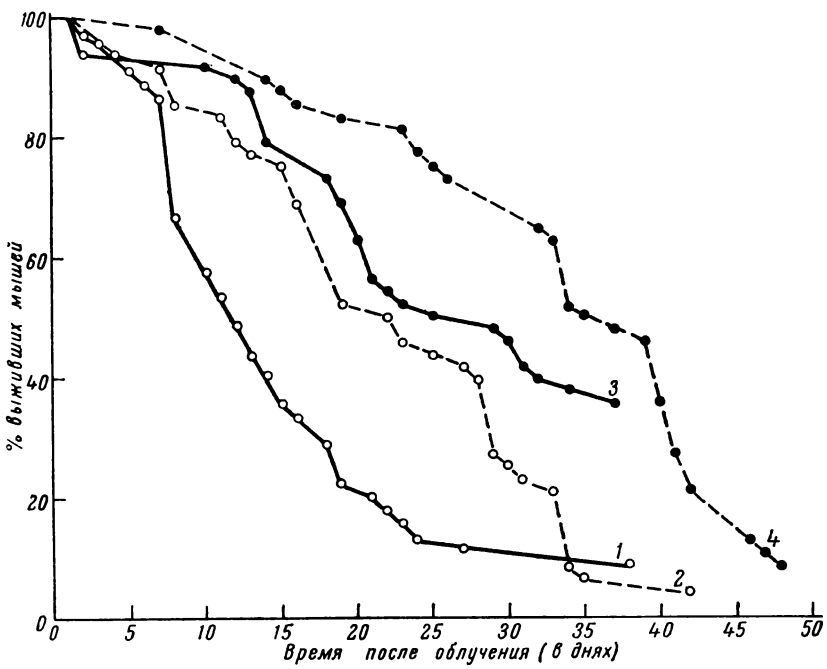


Рис. 8. Кривые смертности мышей после облучения дозой 600 *r*.

1 — контрольные самцы; *2* — самцы от подопытных матерей; *3* — контрольные самки; *4* — самки от подопытных матерей

видно из приведенных данных, самки, полученные от матерей, которым вводился церий, к 30-му дню гибнут в количестве, вдвое меньшем, чем самки, полученные от контрольных животных; у потомков-самцов было обнаружено менее выраженное различие. На рис. 8 приведены кривые, отображающие процент выживших мышей к разным срокам после облу-

чения. Из рисунка видно, что потомство обоего пола, полученное от подопытных самок, более радиорезистентно, чем потомство контрольных животных.

На рис. 9, как и на предыдущем, изображены кривые смертности потомства, облученного дозой 700 r в 4-месячном возрасте.

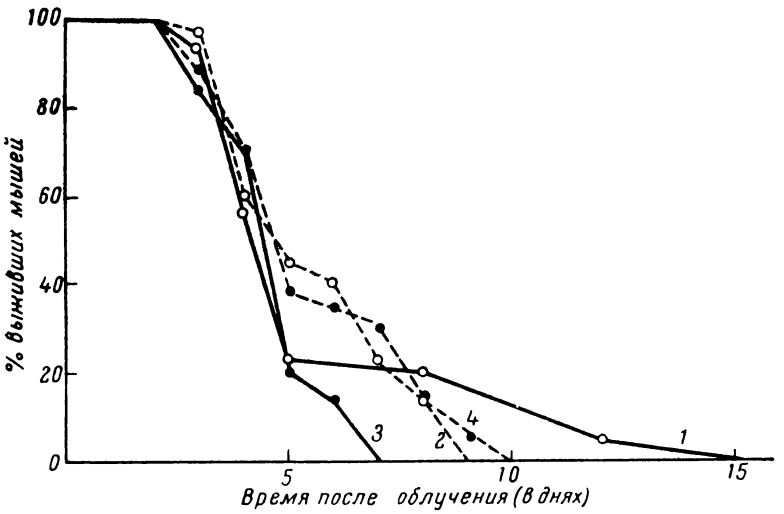


Рис. 9. Кривые смертности мышей после облучения дозой 700 *r*.

1 — контрольные самцы; *2* — самцы от подопытных матерей; *3* — контрольные самки; *4* — самки от подопытных матерей

Ввиду высокой дозы здесь были получены менее явные различия, однако и в этом случае подопытные самки погибали несколько позже контрольных.

Таким образом, приведенные выше материалы указывают на то, что потомство, развивавшееся в организме самок, которым был инкорпорирован радиоцерий, более резистентно к облучению γ-лучами Co^{60}.

ОБСУЖДЕНИЕ

Описанные в данной работе опыты составляют часть исследований, проводимых нашей лабораторией, по выяснению влияния токсических доз инкорпорированных излучателей на воспроизводительную способность самок и самцов, а также развитие и воспроизводительную способность их потомства. Наряду с этим нами исследуется передача потомству через плаценту и молоко инкорпорированных родителям излучателей.

Поскольку подобные опыты многовариантны, изложение их методики и результатов несколько громоздко. Поэтому при обсуждении полученных результатов нам придется возвращаться к некоторым деталям постановки опыта.

Исследования сводились к наблюдению, во-первых, за состоянием мышей-родителей, которым инъецировался радиоцерий, а также их потомства; во-вторых, за воспроизводительной способностью контрольных мышей — родителей и их потомства. Помимо этого, определялось количество передаваемой потомству радиоактивности и, наконец, изучалась радиочувствительность потомства.

Основным показателем общего состояния животных служило изменение их веса в течение опыта, которое, как было установлено в нашей лаборатории на ряде облученных животных, обычно в большей степени отображает общее состояние животных, нежели другие показатели,

включая морфологические и биохимические изменения крови. Как мы видели, инкорпорированные токсические дозы радиоцерия вызвали отставание в приросте веса лишь у мышей-родителей, не оказывая никакого влияния на развитие их потомков.

Воспроизводительная способность у самок поражается при инъекции излучателя в значительно большей степени, чем у самцов. Показателем этого служит снижение рождаемости в тех вариантах опыта, в которых участвовали подопытные самки, независимо от того, подсаживали к ним контрольного или подопытного самца, тогда как рождаемость в вариантах, в которых участвовали подопытные самцы, снижалась лишь в том случае, когда их спаривали с подопытными самками.

Однако, несмотря на то, что воспроизводительная способность самцов, на первый взгляд, не страдала от малой дозы церия, наибольшее снижение рождаемости наблюдалось, когда оба партнера являлись подопытными.

Из этого можно заключить, что данная доза церия все же вызвала «скрытое» или незначительное поражение воспроизводительной способности самцов, резко проявлявшееся лишь при большей дозе радиоцерия.

Несколько особняком стоит приведенное здесь исследование по передаче радиоактивности потомству. Опытами по изучению поведения в организме различных излучателей было установлено, что уже ко второму дню после инкорпорации основная масса радиоактивности фиксируется в органах и тканях и в дальнейшем в крови находится лишь незначительная ее доля. В соответствии с этим И. П. Трегубенко (1955), а также нами, было установлено, что значительные количества радиоактивности передаются плоду через плаценту лишь в том случае, когда излучатель вводят в организм самки во время беременности. Если же излучатель инкорпорируется за несколько дней до начала беременности, то поступление его в плод незначительно. В данной работе церий инкорпорировался самкам за две-три недели до наступления беременности, в связи с чем с потомством была вынесена из организма матери ничтожная доля инкорпорированного излучателя. Не приведенное здесь определение содержания радиоактивности в органах 30-дневного потомства показало, что основная масса изотопа церия откладывается в печени и скелете и в течение всего периода наблюдения (150 дней) практически не выделяется.

Интересные данные были получены при облучении потомства мышей, которым инкорпорировался церий. Следует заметить, что выбранная доза в 600 *r* соответствует для самок взятого штамма мышей ЛД 50/30, а для самцов — ЛД 90/30. К 30-му дню опыта выжило вдвое больше самок от подопытных матерей, чем от контрольных; при облучении самцов разница между потомками подопытных и контрольных животных была значительно меньше, а это несомненно объясняется тем, что данная доза для них близка к абсолютно летальной. Более высокую радиорезистентность потомства, полученного от самок, которым вводили церий, мы объясняем влиянием предварительного облучения, которому подвергалось это потомство на эмбриональной стадии (в среднем в течение 22 дней). Ролью же перешедшего в организм потомков радиоцерия (0,02—0,03%), по-видимому, можно пренебречь.

К настоящему времени в литературе накопилось немало работ, свидетельствующих о благоприятном действии предварительного облучения на выживаемость животных после воздействия ионизирующих излучений в летальных и сублетальных дозах (Куликова, Лучник, Тимофеев-Ресовский и Тимофеева-Ресовская, 1957; Betz, 1950; Cronkite, Sipe, Eltzholtz etc., 1950; Frey, Schaaf a. Trautmann, 1953).

ВЫВОДЫ

1. Изучалось: а) поступление инкорпорированного церия от матери к новорожденным; б) влияние радиоцерия на вес мышей; в) плодовитость животных, которым был инкорпорирован церий, а также плодовитость их потомства; г) радиочувствительность потомства к облучению γ-лучами Co^{60}.

2. Инкорпорированный за две-три недели до наступления беременности церий передается потомкам в количестве 0,02—0,03% от введенного в организм матери.

3. Привес мышей из подопытных групп отстает от контроля.

4. Потомство подопытных мышей развивается наравне с контролем.

5. Доза 0,5 мккюри/г, введенная за две недели до спаривания мышей, не влияет на их плодовитость; с увеличением срока от момента введения радиоизотопа плодовитость самок снижается, а плодовитость самцов остается нормальной.

6. Доза 1,25 мккюри/г, введенная за три недели до спаривания, снижает плодовитость самок и самцов. Более радиочувствительными оказались самки.

7. Среднее число мышат в помете в разные сроки после введения церия в той или иной дозе не отличается от контроля.

8. Плодовитость первого поколения, полученного от мышей, которым инъецировался радиоцерий (0,5 мккюри/г), одинакова с плодовитостью контрольных животных.

9. Потомство, полученное при разных комбинациях скрещивания подопытных (0,5 мккюри/г) и контрольных мышей, оказалось более устойчивым к облучению γ-лучами Co^{60}, причем самки были более радиорезистентны, чем самцы; стойкость к облучению сохранялась в течение длительного времени.

ЛИТЕРАТУРА

Куликова В. Г. Распределение цезия-137 и церия-144 в организме беременных и лактирующих крыс, проникновение их в плод и выделение с молоком (В печати).

Куликова В. Г., Лучник Н. В., Тимофеев-Ресовский Н. В. и Тимофеева-Ресовская Е. А. Лучевые поражения и воздействия на них. III. Влияние предварительного облучения, введения чужеродных сывороток и некоторых гормонов на эффект последующего облучения мышей. Сб. работ Лаборатории биофизики УФАН СССР, Свердловск, 1957.

Трегубенко И. П. Распределение плутония в организме и методы экспериментального воздействия на темп его выделения. Диссертация. М. Ин-т биофиз. АМН СССР, 1955.

Betz H. Sur l'importance de la phase de resistance de l'organisme lors de l'application d'une dose lethale de rayons X. Compt. Rend. Soc. biol., 1950, 144, 19, 1439.

Cronkite E. P., Sipe C. R., Eltzholtz D. C., Chapman W. H. a. Chambers F. W. Increased tolerance of mice to lethal *X*-radiation as a result of previous sublethal exposures. Proc. Soc. Exp. Biol. a. Med., 1950, 73, 184.

Duffy B. J., Codwin J. R., Trunnell J. T. a. Rauson R. W. Radioidine (J^{131}) and gonadae function on experimental and clinical study. J. Clin. Endocrinol., 1950, 10 : 810.

Frey J. G., Schaaf a. Trautmann J. Arztl. Wchschr., 1953, 24 : 571.

Rugh R. Selective sterilization of young female mice by radioidine transmitted through the mother's milk. Proc. Soc. Exper. Biol. a. Med., 1953, 83, 4 : 762.

Sikov M. R. a. Noonan T. Effect of phosphorus-32 on growth and viability of rat embryos. Fed. Proc., 1954, 13 : 1, 1, 137.

Tillotson F. W. a. Rose R. G. A physiopathologic study of the effect of radioactive iodine on the ovary. Am. J. Röentg. Rad. Ther., 1953, 70 : 599.

ВЫВОДЫ

1. Изучалось: а) поступление инкорпорированного церия от матери к новорожденным; б) влияние радиоцерия на вес мышей; в) плодовитость животных, которым был инкорпорирован церий, а также плодовитость их потомства; г) радиочувствительность потомства к облучению γ-лучами Co^{60}.

2. Инкорпорированный за две-три недели до наступления беременности церий передается потомкам в количестве 0,02—0,03% от введенного в организм матери.

3. Привес мышей из подопытных групп отстает от контроля.

4. Потомство подопытных мышей развивается наравне с контролем.

5. Доза 0,5 мккюри/г, введенная за две недели до спаривания мышей, не влияет на их плодовитость; с увеличением срока от момента введения радиоизотопа плодовитость самок снижается, а плодовитость самцов остается нормальной.

6. Доза 1,25 мккюри/г, введенная за три недели до спаривания, снижает плодовитость самок и самцов. Более радиочувствительными оказались самки.

7. Среднее число мышат в помете в разные сроки после введения церия в той или иной дозе не отличается от контроля.

8. Плодовитость первого поколения, полученного от мышей, которым инъецировался радиоцерий (0,5 мккюри/г), одинакова с плодовитостью контрольных животных.

9. Потомство, полученное при разных комбинациях скрещивания подопытных (0,5 мккюри/г) и контрольных мышей, оказалось более устойчивым к облучению γ-лучами Co^{60}, причем самки были более радиорезистентны, чем самцы; стойкость к облучению сохранялась в течение длительного времени.

ЛИТЕРАТУРА

Куликова В. Г. Распределение цезия-137 и церия-144 в организме беременных и лактирующих крыс, проникновение их в плод и выделение с молоком (В печати).

Куликова В. Г., Лучник Н. В., Тимофеев-Ресовский Н. В. и Тимофеева-Ресовская Е. А. Лучевые поражения и воздействия на них. III. Влияние предварительного облучения, введения чужеродных сывороток и некоторых гормонов на эффект последующего облучения мышей. Сб. работ Лаборатории биофизики УФАН СССР, Свердловск, 1957.

Третубенко И. П. Распределение плутония в организме и методы экспериментального воздействия на темп его выделения. Диссертация. М. Ин-т биофиз. АМН СССР, 1955.

Betz H. Sur l'importance de la phase de resistance de l'organisme lors de l'application d'une dose lethale de rayons X. Compt. Rend. Soc. biol., 1950, 144, 19, 1439.

Cronkite E. P., Sipe C. R., Eltzholtz D. C., Chapman W. H. a. Chambers F. W. Increased tolerance of mice to lethal *X*-radiation as a result of previous sublethal exposures. Proc. Soc. Exp. Biol. a. Med., 1950, 73, 184.

Duffy B. J., Codwin J. R., Trunnell J. T. a. Rauson R. W. Radioidine (J^{131}) and gonadae function on experimental and clinical study. J. Clin. Endocrinol., 1950, 10 : 810.

Frey J. G., Schaaf a. Trautmann J. Arztl. Wchschr., 1953, 24 : 571.

Rugh R. Selective sterilization of young female mice by radioidine transmitted through the mother's milk. Proc. Soc. Exper. Biol. a. Med., 1953, 83, 4 : 762.

Sikov M. R. a. Noonan T. Effect of phosphorus-32 on growth and viability of rat embryos. Fed. Proc., 1954, 13 : 1, 1, 137.

Tillotson F. W. a. Rose R. G. A physiopathologic study of the effect of radioactive iodine on the ovary. Am. J. Röentg. Rad. Ther., 1953, 70 : 599.

АКАДЕМИЯ НАУК СССР
УРАЛЬСКИЙ ФИЛИАЛ

Вып. 12 ТРУДЫ ИНСТИТУТА БИОЛОГИИ 1960

Н. В. ЛУЧНИК

ЛУЧЕВЫЕ ПОРАЖЕНИЯ И ВОЗДЕЙСТВИЕ НА НИХ

IV. ВЛИЯНИЕ РАЗЛИЧНЫХ ВЕЩЕСТВ, ВВОДИМЫХ МЫШАМ, НА ЭФФЕКТ ОБЛУЧЕНИЯ

ВВЕДЕНИЕ

Одной из основных задач в области изучения противолучевых средств, уменьшающих вредное биологическое действие излучений, является классификация таких средств, необходимая хотя бы для того, чтобы разобраться в накопленном обширном экспериментальном материале и наметить пути для дальнейших работ.

Некоторые радиобиологи стремятся свести действие всех или почти всех противолучевых средств к одному какому-нибудь механизму. Так, сторонники «гистаминной теории» биологического действия излучений пытаются свести механизм противолучевого действия к влиянию на обмен гистамина (Feldberg u. Schilf, 1930; Ellinger, 1951). Приверженцы теории «стресса» все случаи противолучевого эффекта хотят объяснить действием на систему «гипофиз — кора надпочечников» (Selye, 1950). Ряд авторов сводит действие большинства противолучевых средств к их влиянию на содержание кислорода в облучаемой ткани (Patt, 1953).

С таким подходом нельзя согласиться. Уже самые общие соображения, покоящиеся на твердом фундаменте радиационной физики и химии, убеждают в том, что непосредственным следствием облучения являются самые разнообразные изменения в любых клетках организма. Это подтверждается также результатами многочисленных цитологических, гистологических, биохимических и физиологических исследований. Поэтому следует думать, что воздействовать на биологический эффект облучения можно многими путями, в связи с чем необходимо систематизировать все известные противолучевые средства в соответствии с механизмом их действия.

Однако при современном уровне знаний о механизме противолучевого действия отдельных средств нельзя создать естественную систему, пригодную для практического использования. Поэтому было предложено пользоваться феноменологической классификацией, в основу которой положена временна́я шкала действия (Тимофеев-Ресовский и Лучник, 1957). Согласно этой классификации, все противолучевые средства делятся на четыре класса в зависимости от времени, когда они должны быть применены для достижения противолучевого эффекта. Однако эти

классы слишком велики; дальнейшая работа должна вестись в направлении установления более мелких классификационных единиц.

Установлено, что смертность животных от облучения не распределена во времени равномерно. При дозах порядка ЛД 50/30 на протяжении первых 20 дней после облучения можно различить пять пиков смертности, являющихся, по-видимому, отражением разных причин лучевой смерти (Лучник, 1957). Это обстоятельство имеет существенное значение для исследования противолучевых средств. Анализ данного явления может создать основу для сознательного подбора целых комплексов средств, эффективных при лучевом поражении. В плане же поставленной выше проблемы классификации противолучевых средств установление действия этих средств на определенные пики смертности делает возможной разработку более детальной феноменологической классификации противолучевых средств внутри намеченных ранее четырех классов.

Необходимо, однако, заметить, что анализ пиков смертности при дозах облучения порядка ЛД 50/30 требует проведения опытов на сотнях животных. Это затруднение можно обойти, пользуясь более высокими дозами облучения, при которых все животные погибают в ранние сроки, в пределах одного или двух пиков. Следует указать, что некоторые авторы, независимо от соображений, связанных с существованием пиков смертности, предлагали работать с высокими дозами для уменьшения изменчивости результатов (Bonet-Maury et Patti, 1950; Bacq et Herve, 1952; Clark a. Uncapher, 1949). Однако подобный прием применяется редко, вероятно из-за того, что при столь высоких дозах многие средства, снижающие лучевую смертность при меньших дозах, оказываются неэффективными (Bonet-Maury et Patti, 1950). При дифференциальном же анализе смертности это обстоятельство имеет меньшее значение, так как можно ожидать, что при той же конечной смертности и той же средней продолжительности жизни относительная высота разных пиков будет неодинаковой.

Предпринимая описываемые ниже опыты, мы стремились сопоставить действие на первый и, отчасти, на второй пик смертности большого числа противолучевых средств. При этом преследовались три основные цели: проверить правильность предположения о том, что пики смертности являются отражением разных конечных причин гибели облученных животных, выделить из большого числа средств те, которые снижают первый пик, и, наконец, выяснить, может ли анализ пиков смертности служить основой для классификации противолучевых средств.

МАТЕРИАЛ И МЕТОДИКА

Опыты ставились на мышах и крысах. Методика облучения и условия содержания животных были описаны в одной из предыдущих работ (Лучник, 1957).

В первой части настоящей работы, посвященной определению параметров первого пика и выяснению влияния на него особенностей подопытных животных, были использованы белые крысы и мыши четырех штаммов: «КЧ», «Н», «Х» и «М». Радиобиологическая характеристика этих штаммов также приведена в упомянутой работе.

Вторая часть исследования была проведена на самцах и самках мышей штамма «Н». В этих опытах животных облучали радиокобальтом в дозе 1000 *r* при мощности дозы от 38 до 46 *r* в 1 мин. Испытываемые вещества вводились однократно за 10 дней до облучения, непосредственно перед облучением или сразу после него. Ввиду большого числа применявшихся веществ нет смысла приводить здесь подробности о дозировках и способах их введения; эти сведения будут приведены в таблицах в соответствующих местах экспериментальной части.

В третьем разделе работы описываются результаты опытов, поставленных на большем числе животных при меньших дозах облучения (порядка ЛД 70/30). Первоначально эти опыты были поставлены для выяснения условий, влияющих на противолучевые свойства соответствующих веществ; отдельные группы объединены, так как нас интересовало только влияние этих веществ на пики смертности. Данные, касающиеся отдельных подгрупп, рассматриваются в других работах[1] (Лучник, 1957; Куликова, Лучник, Тимофеев-Ресовский и Тимофеева-Ресовская, 1957).

РЕЗУЛЬТАТЫ ОПЫТОВ

Как уже сказано, опыты распадаются на три группы и в связи с этим будут рассмотрены раздельно. Вначале будут описаны результаты опытов по определению характеристик первого пика; эти опыты явились основой для дальнейших исследований. Затем будут рассмотрены результаты экспериментов по сравнению в стандартных условиях большого числа противолучевых средств. После этого будут приведены результаты некоторых опытов с меньшими дозами облучения.

1. Зависимость первого пика от дозы облучения и особенностей подопытных животных

Прежде чем приступить к сравнительному испытанию различных средств, необходимо было получить исходные контрольные данные для разработки наиболее эффективной стандартной методики. Было известно, что при дозах порядка ЛД 50/30 в первый пик, т. е. через три-четыре дня после облучения, погибает незначительное число животных. Начиная с дозы несколько выше 1000 *r*, наблюдается стопроцентная гибель в первый пик и только при дозах выше 10 000 *r* животные начинают погибать еще раньше (Bonet-Maury et Patti, 1950; Лучник, 1957). Для определения оптимальных условий стандартных опытов необходимо было получить дополнительные данные. Ниже рассматривается зависимость смертности в первый пик от дозы облучения и некоторых особенностей подопытных животных.

Границы первого пика во времени. Чтобы исследовать границы первого пика, проанализируем распределение во времени смертности 180 белых мышей штамма «Н» (90 самцов и 90 самок), облученных радиокобальтом в дозе 1000 *r*. Средняя продолжительность жизни мышей оказалась в этих условиях равной $3{,}74 \pm 0{,}1$ дня. Дисперсия в этом случае значительно меньше, чем при облучении дозами порядка ЛД 50/30 (Лучник, 1957), но все же довольно велика и составляет 3,17 дня. Это дает основание думать, что и здесь мы имеем дело с многовершинной кривой. Оценка средней продолжительности жизни другими способами также указывает на то, что распределение смертности не является нормальным, так как мода равна 3,16 дня, а медиана 3,35 дня. Для выявления пиков цифры были обработаны по способу, описанному раньше (Лучник, 1957). Результаты этой обработки изображены в графической форме на рис. 1. Получилась многовершинная кривая с максимумами около 3,5; 7 и 9,5 дня. Следовательно, и при дозе 1000 *r* часть животных погибает во второй и третий пик, а потому нецелесообразно учитывать их при определении средней продолжительности жизни. За условную границу первого пика естественно принять 5,5 дня, поскольку этой точке соответствует минимум на кривой распределения вероятностей, а также потому, что это время находится

[1] Н. В. Лучник и Е. А. Тимофеева-Ресовская. Лучевые поражения и воздействие на них. V. Влияние цистеина и некоторых других веществ, содержащих серу, на эффект облучения мышей, крыс и гороха. Статья в настоящем сборнике.

как раз на одинаковом расстоянии от обеих вершин. Учитывая только животных, погибших в течение первых 136 час., получим среднюю продолжительность жизни 3,37±0,6 дня, что уже хорошо соответствует медиане и моде. Дисперсия при этом уменьшается до 0,95 дня. Следовательно, 99% мышей, погибающих в первый пик, распределяются в интервале времени между 1,5 и 5,2 дня, что делает вполне оправданным избрание 5,5 дня границей первого пика. Распределение смертности при этом не отличается от нормального. За границу второго пика аналогично можно принять 7,5 дня.

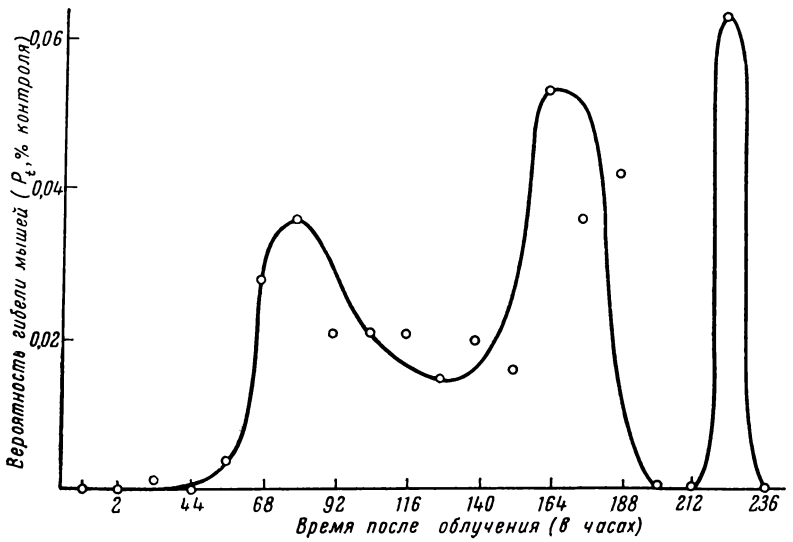


Рис. 1. Распределение вероятностей гибели мышей «Н» во времени (*P*) после гамма-сблучения их дозой 1000 *r*

Влияние вида и штамма животных. Для сравнения чувствительности разных животных была взята несколько меньшая доза — 900 *r*, так как при ней можно было ожидать большей изменчивости результатов, чем при дозе 1000 *r*. Опыт был поставлен на мышах четырех разных штаммов, различающихся радиочувствительностью (ЛД 50/30 варьирует от 410 до 760 *r*), а также на крысах, для которых дозу облучения пришлось снизить до 750 *r*, так как уже при дозе 800 *r* все животные

Таблица 1

Ранняя смертность животных, облученных высокими дозами, и ее зависимость от ЛД 50/30

Подопытные животные	Пол	ЛД 50/30	Доза облучения, (в *r*)	Продолжительность облучения (в минутах)	Число животных	Смертность за 5,5 дня		Средняя продолжительность жизни (в часах)
						число	%	
Мыши «КЧ»	Самки	760	900	85	12	10	83	99
Мыши «Н»	Самки	590	900	20	34	22	65	137
Мыши «Х»	Самцы	560	900	80	33	23	70	112
Мыши «М»	Самцы	410	900	90	13	12	92	86
Мыши «М»	Самцы	410	800	90	15	8	53	131
Белые крысы	Самки	370	750	50	18	18	100	85

погибали раньше 90 час. В табл. 1 сопоставлен процент смертности за 5,5 дня и средняя продолжительность жизни с ЛД 50/30 для соответствующих животных.

Для мышей «Н», «Х» и «М» смертность в первый пик хорошо коррелирует с ЛД 50/30. Мыши «КЧ» и крысы выпадают из этой зависимости, показывая бóльшую смертность, чем этого можно было ожидать из сопоставления с ЛД 50/30.

Влияние пола животных на раннюю лучевую смертность. Для анализа этого явления можно использовать приводившийся выше материал об облучении мышей «Н» дозой 1000 *r*. Соответствующие данные вместе с результатами статистического анализа приведены в табл. 2.

Таблица 2

Смертность самцов и самок мышей «Н» при γ-облучении в дозе 1000 *r*

Пол животных	Число животных	Средняя продолжительность жизни (в часах)	Погибло за 136 часов		χ^2	n	P
			число	%			
Самцы	90	86	84	93,4	2,84	1	0,09
Самки	90	101	77	85,6			

Из приведенных данных видно, что среди самцов смертность в первый пик несколько выше, чем у самок. Статистический анализ показывает, что эта разница близка к реальной. У мышей штамма «Н» самцы оказываются также более чувствительными и в отношении подострой смертности. Поэтому интересно было проанализировать в одном опыте влияние пола на острую и подострую смертность. Рассмотрим с этой целью данные по облучению дозой порядка ЛД 70/30 мышей «М» и «Х». Как известно, самцам первого из этих штаммов свойственна бóльшая радиочувствительность, чем самкам, тогда как у животных второго штамма пол не влияет на радиочувствительность (Лучник, 1957). Результаты этого опыта, приведенные в табл. 3, показывают, что у мышей «М» смертность в первый пик, как и общая смертность за 30 дней, выше у самцов, чем у самок. У мышей «Х» пол животных не влияет ни на раннюю, ни на общую смертность.

Таблица 3

Сравнение радиочувствительности самцов и самок мышей разных штаммов в отношении ранней и подострой смертности

Штамм мышей	Доза облучения (в *r*)	Пол	Число животных	Смертность за 5 дней		Смертность за 30 дней	
				число	%	число	%
«М»	500	Самцы	126	17	13,5	94	74,6
		Самки	136	9	6,6	60	44,1
«Х»	600	Самцы	55	6	10,9	40	72,7
		Самки	75	8	10,7	52	69,4

Таким образом, и опыты, выявляющие влияние пола, подтверждают вывод, сделанный в предыдущем разделе, о том, что ранняя лучевая смертность, происходящая в первый пик, коррелирует с общей 30-дневной смертностью.

Влияние веса животных. Сходное влияние на раннюю смертность оказывает и вес животных. В табл. 4 приведены результаты опытов по облучению мышей «Н» разного веса дозой 1000 *r*.

Таблица 4

Зависимость ранней смертности мышей «Н», облученных 1000 *r*, от веса животных

Вес мышей (в г)	Самцы			Самки		
	число	% смертности за 4 дня	средняя продолжительность жизни (в часах)	число	% смертности за 4 дня	средняя продолжительность жизни (в часах)
Меньше 22 . . .	12	92	83	12	75	89
22 — 24	18	94	82			
Больше 24	18	78	93	12	50	99

Материал по облучению самцов и самок не объединяется, так как радиочувствительность самцов и самок мышей «Н» различна и средний вес самок в этих опытах выше веса самцов. Приведенные цифры показывают, что имеет место небольшое, но закономерное влияние веса животных на смертность в первый пик. Эти данные подтверждают также сделанный ранее вывод, что и для мышей одинакового веса чувствительность самок несколько ниже, чем самцов. Необходимо отметить, что у мышей «Н» вес влияет также и на ЛД 50/30 и в том же направлении, что и в отношении смертности в первый пик.

Подводя итоги трем последним разделам, можно сделать следующий общий вывод: вес, пол, принадлежность к тому или иному штамму мало влияют на раннюю лучевую смертность, хотя при дозах ниже ЛД 100/4 эти факторы оказывают некоторое влияние. Из табл. 5 видно, что с увеличением дозы облучения влияние этих факторов уменьшается.

Таблица 5

Ранняя смертность мышей трех разных штаммов после облучения дозами 900 и 1000 *r*

Пол и штамм подопытных мышей	Доза облучения					
	900 *r*			1000 *r*		
	число мышей	погибло за 5 дней (в %)	средняя продолжительность жизни (в часах)	число мышей	погибло за 5 дней (в %)	средняя продолжительность жизни (в часах)
Самцы «М»	13	92	86	12	100	79
Самцы «Х»	33	70	112	16	81	89
Самцы «Н»	34	65	137	90	93	84

Из сопоставления приведенных данных можно видеть, что при большей дозе облучения разница между штаммами уменьшается.

В пределах одного и того же вида ранняя смертность обычно коррелирует с ЛД 50/30. Для разных видов соотношение между ранней и поздней (30-дневной) смертностью может быть разным. Вообще же при ранней смертности наблюдается меньшая изменчивость результатов, чем при поздней смертности.

Зависимость эффекта от дозы облучения. Стопроцентная гибель животных в течение первых четырех суток имеет место только при дозах выше 1000 *r*, однако и при более низких дозах некоторые особи погибают в первый пик. Поэтому интересно сравнить число животных, погибших в первый пик при разных дозах облучения, и попытаться описать количественно зависимость эффекта от дозы. Ниже это делается для крыс и трех

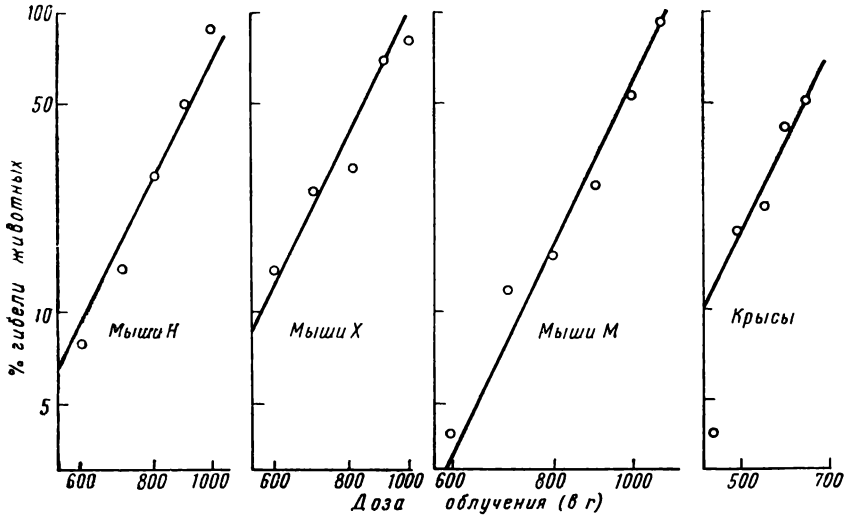


Рис. 2. Зависимость смертности животных в течение 136 часов от дозы облучения

штаммов мышей. За критерий эффекта принята смертность в течение первых 136 часов после облучения. Для всех четырех групп зависимость эффекта от дозы в первом приближении описывается степенной функцией, которая, как известно дает в логарифмическом масштабе прямые. Поэтому на рис. 2 результаты опытов изображены в логарифмическом масштабе. Для всех групп животных зависимость эффекта от дозы хорошо соответствует уравнению:

$$y = ax^4,$$

где y — смертность за 136 часов,
x — доза в килорентгенах.

Для мышей коэффициент a равен примерно 0,01, для крыс — 0,03. Кривые эффекта дозы имеют, таким образом, довольно необычную форму, причем для них характерно отсутствие точки перегиба: при высоких дозах нет эффекта насыщения. В настоящее время было бы преждевременно давать теоретическое объяснение этой зависимости, и мы рассматриваем ее лишь как удобную интерполяционную формулу. Однако такая необычная форма кривых может представлять значительный интерес, а потому заслуживает специального изучения.

2. Влияние противолучевых средств на смертность мышей, облученных дозой 1000 *r*

В этом разделе будут описаны опыты, рассмотрение которых является основной целью настоящей работы. Мы хотели в стандартных условиях сравнить действие большого числа противолучевых средств на первый и, отчасти, на второй пик смертности. В опытах такого рода особенно важен

вопрос о числе подопытных животных. Слишком малое число их дает ненадежные результаты, а слишком большое заставляет ограничиваться небольшим количеством исследуемых веществ. После рассмотрения результатов контрольных опытов мы остановились на 12 мышах, так как при этом числе животных снижение первого пика вдвое можно установить со статистической достоверностью. Вместе с тем ввиду небольшого числа животных пришлось отказаться от применения обычных статистических критериев, которые в данном случае были бы надежными. Поэтому приходилось вычислять точные вероятности из разложения соответствующего бинома. Составленная для этой цели табл. 6 показывает вероятность гибели определенного числа животных к концу каждого из трех учетных сроков.

Таблица 6

Таблица для статистической обработки результатов опыта

Число погибших животных	Учетный срок		
	5,5 дня	7,5 дня	10 дней
12	1,00000	1,00000	1,00000
11	0,82947	0,21122	0,03846
10	0,51112	0,02142	0,00136
9	0,23126	0,00219	0,00004
8	0,07809	0,00015	0,00000
7	0,01999	0,00001	0,00000
6	0,00391	0,00000	0,00000
5	0,00058	0,00000	0,00000
4	0,00007	0,00000	0,00000
3	0,00001	0,00000	0,00000
2	0,00000	0,00000	0,00000
1	0,00000	0,00000	0,00000
0	0,00000	0,00000	0,00000

Примечание. В таблице приводится вероятность случайного выживания разного числа мышей из группы в 12 штук через 5,5; 7,5 и 10 дней после γ-облучения в дозе 1000 *r*. Вычислено по способу Фишера на основании данных, полученных на 300 контрольных мышах, среди которых смертность в указанные сроки равнялась соответственно 86,3; 98,4 и 100% (абсолютное число погибших животных: 259, 295 и 300).

При дальнейшем описании опытов они будут разбиты на три группы в соответствии со временем введения противолучевых средств.

Опыты с профилактическими средствами. Профилактическими мы называем такие противолучевые средства, которые оказывают эффект при применении за несколько дней до облучения (Тимофеев-Ресовский и Лучник, 1957). Предполагается, что эти вещества вызывают своего рода иммунизацию, которая может быть неспецифической или более или менее специфической. В описываемых опытах было испытано 10 таких средств, применявшихся за 10 дней до облучения. Пять из них (диэтилстильбэстрол, лошадиная сыворотка, метилтестостерон, фолликулин и предварительное облучение малыми дозами) уже применялись раньше в опытах с меньшими дозами облучения (500—700 *r*) и дали положительные результаты (Куликова, Лучник, Тимофеев-Ресовский и Тимофеева-Ресовская, 1957). Остальные средства были новыми и избраны или по

аналогии с уже известными (прогестерон, молоко), или как вещества, оказывающие на организм сходное с ионизирующими лучами действие (гистамин, уретан, эмбихин).

Таблица 7

Результаты применения различных профилактических средств и статистическая обработка полученных данных

Применяемое средство	Дозировка	Способ введения	Пол мышей	Погибло до облучения	После облучения через 5,5 дня: погибло	5,5 дня: выжило	5,5 дня: P	После облучения через 7,5 дня: погибло	7,5 дня: выжило	7,5 дня: P	После облучения через 10 дней: погибло	10 дней: выжило	10 дней: P
Гистамин	5 мг	вб	Самцы и самки	7	9	3	0,2313	11	1	0,2112	12	0	1,0000
Диэтилстильбэстрол	0,1 мг	пк, вб	Самки и самцы	0	1	11	0,0000	2	10	0,0000	9	3	0,0000
Лошадиная сыворотка	0,5 см³	пк, вб	Самки и самцы	1	11	1	0,8295	12	0	1,0000	12	9	1,0000
Метилтестостерон	1,0 мг	вб	Самцы	0	12	0	1,0000	12	0	1,0000	12	0	1,0000
Молоко	0,5 см³	вб	Самцы	1	11	1	0,8295	12	0	1,0000	12	0	1,0000
Предварительное облучение	150 *r*	—	Самки	0	6	6	0,0039	8	4	0,0002	12	0	1,0000
Прогестерон	2,0 мг	вб	Самцы	0	12	0	1,0000	12	0	1,0000	12	0	1,0000
Уретан	10 мг	вб	Самцы	1	12	0	1,0000	12	0	1,0000	12	0	1,0000
Фолликулин	1000 ед.	пк, вб	Самцы и самки	2	4	8	0,0001	7	5	0,0000	11	1	0,0385
Эмбихин	0,1 мг	вв	Самцы	2	4	8	0,0001	7	5	0,0000	12	0	1,0000

Примечание. В этой и последующих таблицах для способа введения применены следующие сокращения: вб — внутрибрюшинно, вв — внутривенно, пк — подкожно, по — перорально, вм — внутримышечно.

Основные результаты опытов представлены в табл. 7. Здесь приводится число погибших и выживших животных на каждый из трех учетных сроков вместе с результатами статистического сравнения с контрольной смертностью, а также указан способ введения того или иного средства.

В табл. 8 приводятся средняя продолжительность жизни, а также процент смертности на каждый из учетных сроков, причем для первого даются доверительные пределы; аналогичные цифры приводятся также для контрольных мышей, облучавшихся одновременно с подопытными (собственный контроль). Результаты всех опытов обрабатывались и другими способами, но способ, представленный в табл. 7, оказался более чувствительным. Обычное сравнение процента животных, выживающих к 20-му или 30-му дню, здесь, конечно, неприменимо, так как практически все животные погибают раньше. Через все пики смертности «проскочили» только две мыши из опыта с диэтилстильбэстролом, погибшие через 28 и 30 дней.

Таким образом, из 10 средств, испытанных в качестве профилактических, эффективными оказались только диэтилстильбэстрол, фолликулин, эмбихин и предварительное облучение. Интересно отметить, что перечисленные средства снизили первый пик. Как увидим ниже, другие противолучевые средства в аналогичных опытах чаще снижают более поздние пики, не влияя на первый. Возможно, что действие на первый пик является общим свойством профилактической группы противолучевых средств,

но для такого утверждения необходим материал по большему числу средств. Тот факт, что уже известные в качестве противолучевых средств метилтестостерон и лошадиная сыворотка не снизили в этих опытах первого пика, не является опровержением высказанной точки зрения. Лошадиная сыворотка, как было специально показано в опытах с меньшими дозами облучения, довольно избирательно действует именно на первый пик (Тимофеев-Ресовский и Куликова, не опубликовано), оказывая при этом более слабый эффект, чем другие профилактические противолучевые средства (Куликова, Лучник, Тимофеев-Ресовский и Тимофеева-Ресовская, 1957). Что же касается метилтестостерона, то известно, что это вещество далеко не всегда оказывает противолучевое действие, причем оказываемый им эффект зависит от каких-то еще точно не установленных сопутствующих условий. Интересно, что, как показали опыты, фолликулин и диэтилстильбэстрол, вещества, сходно действующие на организм, обладают одинаковым «противолучевым спектром»; оба достоверно снизили смертность мышей во все три пика.

Опыты с защитными веществами. Бóльшая часть испытанных в рассматриваемых опытах средств относится к разряду «защитных веществ», т. е. веществ, оказывающих противолучевой эффект только при введении непосредственно перед облучением. И это не случайно: большинство известных в настоящее время противолучевых средств относится именно к этому классу. При выборе веществ для опытов мы стремились взять по нескольку наиболее типичных представителей из разных групп противолучевых средств этого класса.

Подробности, касающиеся постановки отдельных опытов, и полученные результаты приводятся в табл. 9 и 10, аналогичных табл. 7 и 8 предыдущего раздела. Как видно из этих таблиц, из 50 испытанных веществ 19 дали реальный положительный эффект, причем многие из них в отличие от профилактических средств оказали избирательное действие на разные пики. Так, например, наиболее интересующий нас первый пик реально снизился при введении десяти веществ: берберина, пирувата натрия, цистеина, натриевой соли этилендиаминтетрауксусной кислоты, яблочнокислого натрия, янтарной кислоты, уксуснокислого натрия, лошадиной сыворотки и лизина, причем первые пять обусловили «тройной проскок». Янтарная кислота снизила два первых пика, а лизин, лошадиная сыворотка и ацетат избирательно подействовали на первый пик. Интересно, что из девяти веществ, эффективных в смысле снижения первого пика, пять имеют отношение к лимоннокислому циклу — обстоятельство, на котором мы специально остановимся в обсуждении. Из остальных эффективных веществ восемь избирательно снизили второй пик (анилид тиогликолевой кислоты, гидросульфит, гипосульфит, гликоколл, кофеин, серин, стрихнин и тиомочевина), а два (аланин и уксуснокислый натрий) снизили второй и третий пики. Большинство этих средств являются аминокислотами или веществами, содержащими серу, т. е. принадлежат к наиболее известным группам защитных веществ.

Из 50 испытанных веществ 31 в условиях наших опытов оказалось неэффективным. Не понизили реально ни одного из трех пиков смертности следующие вещества: адреналин, аконитовая кислота, ацетон, аценафтен, гексенал, гистамин, глюкоза, димедрол, желатин, инсулин, хлористый кальций, камполон, кобаламин, морфин, ниацин, нитрит, парафенилендиамин, пиридоксин, рибофлавин, танин, тиамин, уретан, фолликулин, фолиевая кислота, фумарат, хинозол, цианистый калий, этиловый спирт, этилендиамин и эфедрин. Следовательно, целые группы известных противолучевых средств, такие, например, как амины, витамины, гипертонические растворы и другие, не оказали в данном случае никакого действия. Такие результаты нисколько не противоречат данным о их противолуче-

Влияние различных средств, применяемых за 10 дней до облучения,

Применяемое воздействие	Средняя продолжительность жизни (в днях)	Опыт		
		% смертности через		
		5,5 дня	7,5 дня	10 дней
Гистамин	2,54±0,79	75,0 (47,7—92,5)	91,7	100,0
Диэтилстильбэстрол	11,75±2,35	8,3 (0,5—33,6)	16,7	75,0
Лошадиная сыворотка	3,79±0,23	91,7 (66,4—99,5)	100,0	100,0
Метилтестостерон	3,21±0,20	100 (78,2—100)	100,0	100,0
Молоко	3,71±0,45	91,7 (66,4—99,5)	100,0	100,0
Предварительное облучение	6,25±0,66	50,0 (25,0—75,0)	66,7	100,0
Прогестерон	3,41±0,20	100 (78,2—100)	100,0	100,0
Уретан	2,75±0,33	100 (78,2—100)	100,0	100,0
Фолликулин	6,45±0,91	33,3 (12,9—60,6)	58,3	91,7
Эмбихин	5,91±0,50	33,3 (12,9—60,6)	58,3	100,0

вом эффекте. Они показывают только, что эти средства оказываются неэффективными при дозе 1000 *r*, при которой животные погибают преимущественно в первый пик.

Опыты с терапевтическими средствами. В качестве терапевтических противолучевых средств, т. е. средств, применяемых после облучения, было испытано 20 веществ. Терапевтическое противолучевое действие некоторых из этих веществ известно было из литературы, эффективность остальных была установлена в нашей лаборатории в опытах с меньшими дозами облучения. В этих опытах 18 из 20 веществ оказали более или менее выраженный эффект. Неэффективными и при меньших дозах были гомогенаты селезеночной ткани и цистеин, вводимый после облучения [1].

Подробности, касающиеся постановки отдельных опытов, и полученные результаты приведены в табл. 11 и 12. Как видно из этих таблиц, из 20 испытанных средств в условиях опыта оказались эффективными только 7, а именно: анилид тиогликолевой кислоты, аценафтен, берберин, новокаин, печеночный экстракт, пируват натрия и питуитрин. Остальные 13 веществ — атропин, дезоксикортикостеронацетат, дрожжевой экстракт, карбохолин, лецитин, метилтестостерон, миоль, рибонуклеинат натрия, селезеночный гомогенат, стрептомицин, хлорная ртуть, холестерин и цистеин — не оказали реального эффекта ни в один из трех учетных сроков. Уже первый взгляд на полученные результаты показывает резкую разницу в спектре противолучевого действия профилактических и терапевтических средств. Из семи эффективных терапевтических средств первый пик снизили только три вещества (берберин, новокаин и пируват натрия), при этом берберин и новокаин снизили все три пика, а пируват снизил первый и второй. Второй пик снизили все семь веществ; при этом печеночный экстракт снизил второй и третий пик, а анилид тиогликолевой кислоты, аценафтен и питуитрин избирательно снизили только второй пик.

Следует сказать несколько слов о так называемых «неэффективных воздействиях». Что касается таких средств, как атропин, метилтестостерон или хлорная ртуть, то их неэффективность в рассматриваемых опытах вполне понятна, так как относительно этих средств и из литературы

[1] Эти опыты были поставлены раньше, чем соответствующие опыты с меньшими дозами облучения.

Таблица 8

на смертность мышей, облученных дозой 1000 *r* γ-лучей

Применяемое воздействие	Средняя продолжительность жизни (в днях)	Контроль		
		% смертности через		
		5,5 дня	7,5 дня	10 дней
Гистамин	4,5±0,70	75,0 (47,7—92,5)	91,7	100,0
Диэтилстильбэстрол	5,70±0,51	58,3 (32,0—81,5)	91,7	100,0
Лошадиная сыворотка	5,70±0,51	58,3 (32,0—81,5)	91,7	100,0
Митилтестостерон	3,58±0,30	91,7 (66,4—99,5)	100,0	100,0
Молоко	3,50±0,39	91,7 (66,4—99,5)	100,0	100,0
Предварительное облучение	3,45±0,15	100 (78,2—100)	100,0	100,0
Прогестерон	3,58±0,30	91,7 (66,4—99,5)	100,0	100,0
Уретан	3,5±0,39	91,7 (66,4—99,5)	100,0	100,0
Фолликулин	5,70±0,51	58,3 (32,0—81,5)	91,7	100,0
Эмбихин	4,87±0,35	75,0 (47,7—92,5)	100,0	100,0

и из наших собственных опытов с меньшими дозами известно, что они дают довольно непостоянный эффект. Другое дело такие средства, как дрожжевые экстракты, нуклеиновая кислота, лецитин или стрептомицин, относительно которых у нас имеется обширный материал, показывающий, что при дозах порядка ЛД 50/30 эти средства дают значительный и хорошо воспроизводимый лечебный эффект и превосходят в этом отношении аценафтен, питуитрин и печеночные экстракты, оказавшиеся в этом опыте эффективными. Это противоречие проще всего объяснить влиянием дозы облучения. Ниже будет показано, что, например, дрожжевые экстраты, оказывая при меньших дозах облучения значительный терапевтических эффект за счет снижения более поздних пиков, несколько повышают первый пик; поэтому при дозе 1000 *r*, когда большинство животных погибает в первый пик, от дрожжевых экстрактов и нельзя ожидать положительного эффекта.

Из этих опытов следует сделать один общий вывод, что первый пик с трудом поддается терапевтическим воздействиям. Впрочем, и при облучении животных меньшими дозами только немногие вещества оказываются эффективными при применении их после облучения. Общепризнано в настоящее время только положительное действие антибиотиков и препаратов селезенки и костного мозга, однако и эти средства зачастую дают изменчивые результаты. А такие средства, как хлорная ртуть, комбинация цистеина и аскорбиновой кислоты, дезоксикортикостеронацетат, атропин, большинством авторов считаются неэффективными, так как положительное действие от их применения удавалось получать только в одной-двух лабораториях в строго определенных и не всегда точно определимых условиях. Из рассмотренных в этом разделе данных следует также, что можно ожидать хорошего терапевтического эффекта при комбинированных воздействиях. Главными затруднениями при этом являются ограниченное число средств, снижающих первый пик, и отсутствие воздействий, полностью снижающих этот пик. Поэтому в исследованиях по противолучевым средствам, на наш взгляд, важнейшее место должны занимать поиски новых веществ, действующих на первый пик при применении после облучения, и подробнейшее исследование уже известных средств.

Таблица 9

Результаты применения различных защитных веществ и статистическая обработка полученных данных

Вводимое вещество	Дозировка	Способ введения	Пол мышей	Погибло до облучения	После облучения через								
					5,5 дня			7,5 дня			10 дней		
					погибло	выжило	*P*	погибло	выжило	*P*	погибло	выжило	*P*
Адреналин	0,02—0,05 мг	вв	Самцы и самки	1	12	0	1,0000	12	0	1,0000	12	0	1,0000
Аконитат	5 мг	вб	Самки	0	12	0	1,0000	12	0	1,0000	12	0	1,0000
Аланин	5 мг	вб	»	0	10	2	0,5111	10	2	0,0214	10	2	0,0014
Анилид тиогликолевой кислоты	3 мг	вб	»	0	9	3	0,2313	10	2	0,0214	12	0	1,0000
Аскорбиновая кислота	15 мг	вб, вв	»	2	12	0	1,0000	12	0	1,0000	12	0	1,0000
Ацетон	4 мг	»	»	0	12	0	1,0000	12	0	1,0000	12	0	1,0000
Аценафтен	1 мг	вб	»	0	8	4	0,0781	12	0	1,0000	12	0	1,0000
Берберин	0,1 мг	вб	»	0	7	5	0,0200	9	3	0,0022	11	1	0,0385
Гексенал	2 мг	вб	Самцы и самки	0	12	0	1,0000	12	0	1,0000	12	0	1,0000
Гидросульфит	10 мг	вб	Самцы	0	9	3	0,2313	9	3	0,0022	12	0	1,0000
Гипосульфит	20 мг	вб	»	0	9	3	0,2313	10	2	0,0214	12	0	1,0000
Гистамин	5—10 мг	вб	Самцы и самки	2	11	1	0,8295	12	0	1,0000	12	0	1,0000
Гликоколл	5 мг	вб	Самки	0	9	3	0,2313	10	2	0,0214	12	0	1,0000
Глюкоза	50 мг	вв	»	0	8	4	0,0781	12	0	1,0000	12	0	1,0000
Димедрол	2 мг	вб	»	1	10	2	0,5111	12	0	1,0000	12	0	1,0000
Желатин	20 мг	вб, вв	»	0	12	0	1,0000	12	0	1,0000	12	0	1,0000
Инсулин	0,01—0,2 ед	пк	Самцы	2	12	0	1,0000	12	0	1,0000	12	0	1,0000
Кальцийхлорид	2 мг	вб, вв	»	0	12	0	1,0000	12	0	1,0000	12	0	1,0000
Камполон	0,2 см³	вб, пк	Самки	0	12	0	1,0000	12	0	1,0000	12	0	1,0000
Кобаламин	0,015 мг	вв	Самцы	0	10	2	0,5111	12	0	1,0000	12	0	1,0000
Кофеин	2 мг	вв	»	0	9	3	0,2313	10	2	0,0214	12	0	1,0000
Лизин	5 мг	вб	»	0	5	7	0,0006	12	0	1,0000	12	0	1,0000
Лошадиная сыворотка	0,5 см³	вб	»	0	7	5	0,0200	11	1	0,2112	12	0	1,0000
Морфин	1 мг	вб, пк	»	0	11	1	0,8295	11	1	0,2112	12	0	1,0000
Ниацин	2 мг	вб, вв	»	0	12	0	1,0000	12	0	1,0000	12	0	1,0000

Таблица 9 (продолжение)

Вводимое вещество	Дозировка	Способ введения	Пол мышей	Погибло до облучения	После облучения через 5,5 дня: погибло	5,5 дня: выжило	5,5 дня: P	7,5 дня: погибло	7,5 дня: выжило	7,5 дня: P	10 дней: погибло	10 дней: выжило	10 дней: P
Нитрит натрия	2 мг	вб, вв	Самцы	6	12	0	1,0000	12	0	1,0000	12	0	1,0000
Парафенилендиамин	1 мг	вб	»	0	11	1	0,8295	11	1	0,0212	12	0	1,0000
Пиридоксин	1 мг	вб	»	0	12	0	1,0000	12	0	1,0000	12	0	1,0000
Пируват натрия	5 мг	вб	»	0	2	10	0,0000	6	6	0,0000	10	2	0,0014
Рибофлавин	2 мг	вб	»	1	10	2	0,5111	12	0	1,0000	12	0	1,0000
Серин	5 мг	вб	»	0	10	2	0,5111	10	2	0,0214	12	0	1,0000
Стрихнин	0,05 мг	по	»	7	8	4	0,0781	10	2	0,0214	12	0	1,0000
Танин	1 мг	вб	»	0	12	0	1,0000	12	0	1,0000	12	0	1,0000
Тиамин	1 мг	вб, вв	»	0	9	3	0,2313	12	0	1,0000	12	0	1,0000
Тиомочевина	20 мг	вб	»	0	8	4	0,0781	9	3	0,0022	12	0	1,0000
Уксуснокислый натрий	5 мг	вб	Самцы и самки	0	7	5	0,0200	11	1	0,2112	12	0	1,0000
Уретан	10 мг	вб	Самки	0	12	0	1,0000	12	0	1,0000	12	0	1,0000
Фолликулин	1000 ЕД	вб, вм	»	0	12	0	1,0000	12	0	1,0000	12	0	1,0000
Фолиевая кислота	1 мг	вб	Самцы и самки	0	9	3	0,2313	12	0	1,0000	12	0	1,0000
Фумарат	5 мг	вб	Самки	0	12	0	1,0000	12	0	1,0000	12	0	1,0000
Хинозол	0,5—1 мг	вб	Самцы	0	11	1	0,8295	11	1	0,2112	12	0	1,0000
Цианистый калий	0,1 мг	вб	Самцы и самки	0	11	1	0,8295	11	1	0,2112	12	0	1,0000
Цистеин	15 мг	вв	Самки	0	7	5	0,0200	10	2	0,0214	11	1	0,0385
Цитрат натрия	5 мг	вб	»	0	9	3	0,2313	9	3	0,0022	11	1	0,0385
Этанол	50 мг	вв	Самцы и самки	0	11	1	0,8295	11	1	0,0212	12	0	1,0000
Этилендиамин	3 мг	вб, вв	Самки	0	10	2	0,5111	12	0	1,0000	12	0	1,0000
ЭДТА	2 мг	вб	»	0	7	5	0,0200	7	5	0,0000	11	1	0,0385
Эфедрин	0,1—1,0 мг	вб	Самцы	0	12	0	1,0000	12	0	1,0000	12	0	1,0000
Яблочнокислый натрий	5 мг	вб	Самцы и самки	0	7	5	0,0200	7	5	0,0000	11	1	0,0385
Янтарная кислота	5 мг	вб	Самки	0	7	5	0,0200	8	4	0,0002	12	0	1,0000

Таблица 10

Влияние различных защитных веществ, вводимых непосредственно перед облучением, на смертность мышей, облученных дозой 1000 *r* γ-лучей

Вводимое вещество	Опыт				Контроль			
	Средняя продолжительность жизни (в днях)	% смертности через			Средняя продолжительность жизни (в днях)	% смертности через		
		5,5 дня	7.5 дня	10 дней		5,5 дня	7,5 дня	10 дней
Адреналин	3,09±0,40	100 (78,2—100)	100,0	100,0	4,16±0,20	100 (78,2—100)	100,0	100,0
Аконитат	3,04±0,23	100 (78,2—100)	100,0	100,0	3,46±0,09	100 (78,2—100)	100,0	100,0
Аланин	6,04±1,46	83,3 (56,5—96,7)	83,3	83,3	3,66±0,43	91,7 (66,4—99,5)	91,7	100,0
Анилид тиогликолевой кислоты	4,33±0,64	75,0 (47,7—92,5)	83,3	100,0	4,37±0,33	83,3 (56,5—96,7)	100,0	100,0
Аскорбиновая кислота	3,17±0,44	100 (78,2—100)	100,0	100,0	4,29±0,42	83,3 (56,5—96,7)	100,0	100,0
Ацетон	3,46±0,13	100 (78,2—100)	100,0	100,0	4,0±0,35	91,7 (66,4—99,5)	100,0	100,0
Аценафтен	4,58±0,59	66,7 (39,4—87,1)	100,0	100,0	3,54±0,30	100 (18,2—100)	100,0	100,0
Берберин	5,58±0,80	58,3 (32,0—81,5)	75,0	91,7	3,95±0,42	83,3 (56,5—96,7)	100,0	100,0
Гексенал	3,58±0,38	100 (78,2—100)	100,0	100,0	4,25±0,35	83,3 (56,5—96,7)	100,0	100,0
Гидросульфит	5,25±0,61	75,0 (47,7—92,5)	75,0	100,0	3,87±0,45	91,7 (66,4—99,5)	91,7	100,0
Гипосульфит	4,50±0,58	75,0 (47,7—92,5)	75,0	100,0	3,37±0,16	100 (78,2—100)	100,0	100,0
Гистамин	3,09±0,55	91,7 (66,4—99,5)	100,0	100,0	3,33±0,24	91,7 (66,4—99,5)	100,0	100,0
Гликоколл	4,96±0,66	75,0 (47,7—92,5)	83,3	100,0	3,95±0,40	91,7 (66,4—99,5)	100,0	100,0
Глюкоза	4,66±0,49	66,7 (39,4—87,1)	100,0	100,0	4,75±0,42	66,7 (39,4—87,1)	100,0	100,0
Димедрол	3,87±0,46	83,3 (56,5—96,7)	100,0	100,0	3,86±0,26	91,7 (66,4—99,5)	100,0	100,0
Желатин	3,58±0,14	100 (78,2—100)	100,0	100,0	3,41±0,14	100 (78,2—100)	100,0	100,0
Инсулин	2,21±0,33	100 (78,2—100)	100,0	100,0	3,37±0,12	100 (78,2—100)	100,0	100,0
Кальцийхлорид	3,29±0,13	100 (78,2—100)	100,0	100,0	3,09±0,12	100 (78,2—100)	100,0	100,0
Камполон	3,75±0,27	100 (78,2—100)	100,0	100,0	3,91±0,18	100 (78,2—100)	100,0	100,0
Кобаламин	4,12±0,35	83,3 (56,5—96,7)	100,0	100,0	3,75±0,43	83,3 (56,5—96,7)	100,0	100,0
Кофеин	4,67±0,57	75,0 (47,7—92,5)	83,3	100,0	3,75±0,20	100 (78,2—100)	100,0	100,0
Лизин	5,37±0,49	41,7 (18,5—68,0)	100,0	100,0	4,54±0,43	83,3 (56,5—96,7)	91,7	100,0
Лошадиная сыворотка	5,04±0,50	58,3 (32,0—81,5)	91,7	100,0	4,0±0,31	91,7 (66,4—99,5)	100,0	100,0
Морфин	3,79±0,33	91,7 (66,4—99,5)	91,7	100	3,34±0,24	91,7 (66,4—99,5)	100,0	100,0

Таблица 10 (продолжение)

Вводимое вещество	Опыт				Контроль			
	Средняя продолжительность жизни (в днях)	% смертности через			Средняя продолжительность жизни (в днях)	% смертности через		
		5,5 дня	7,5 дня	10 дней		5,5 дня	7,5 дня	10 дней
Ниацин	3,87±0,18	100 (78,2—100)	100,0	100,0	3,63±0,25	100 (78,2—100)	100,0	1 00,0
Нитрит натрия	1,75±0,38	100 (78,2—100)	100,0	100,0	4,04±0,42	83,3 (56,5—96,7)	100,0	100,0
Парафенилендиамин	4,13±0,44	91,7 (66,4—99,5)	91,7	100,0	3,75±0,45	83,3 (56,5—96,7)	100,0	100,0
Пиридоксин	3,25±0,13	100 (78,2—100)	100,0	100,0	3,58±0,17	100 (78,2—100)	100,0	100,0
Пируват натрия	7,79±0,60	16,7 (3,3—43,5)	50,0	83,3	5,33±0,74	66,7 (39,4—87,1)	75,0	91,7
Рибофлавин	4,12±0,56	83,3 (56,5—96,7)	100,0	100,0	3,58±0,24	100 (78,2—100)	100,0	100,0
Серин	4,50±0,63	83,3 (56,5—96,7)	83,3	100,0	3,37±0,12	100 (78,2—100)	100,0	100,0
Стрихнин	3,08±0,81	66,7 (39,4—87,1)	83,3	100,0	3,79±0,29	100 (78,2—100)	100,0	100,0
Танин	3,33±0,17	100 (78,2—100)	100,0	100,0	3,58±0,16	100 (78,2—100)	100,0	100,0
Тиамин	4,79±0,36	75,0 (47,7—92,5)	100,0	100,0	4,43±0,39	83,3 (56,5—96,7)	100,0	100,0
Тиомочевина	5,10±0,72	66,7 (39,4—87,1)	75,0	100,0	3,54±0,21	100 (78,2—100)	100,0	100,0
Уксуснокислый натрий	4,91±0,50	58,3 (32,0—81,5)	91,7	100,0	4,75±0,70	75,0 (47,7—92,5)	83,3	91,7
Уретан	3,33±0,05	100 (78,2—100)	100,0	100,0	3,50±0,17	100 (78,2—100)	100,0	100,0
Фолликулин	3,46±0,15	100 (78,2—100)	100,0	100,0	3,50±0,06	100 (78,2—100)	100,0	100,0
Фолиевая кислота	4,00±0,47	75,0 (47,7—92,5)	100,0	100,0	3,58±0,17	100 (78,2—100)	100,0	100,0
Фумарат	4,33±0,21	100 (78,2—100)	100,0	100,0	3,37±0,11	100 (78,2—100)	100,0	100,0
Хинозол	1,96±0,13	91,7 (66,4—99,5)	100,0	100,0	3,54±0,06	100 (78,2—100)	100,0	100,0
Цианистый калий	3,87±0,45	91,7 (66,4—99,5)	91,7	100,0	3,25±0,10	100 (78,2—100)	100,0	100,0
Цистеин	5,50±0,69	58,3 (32,0—81,5)	83,3	91,7	4,25±0,36	83,3 (56,5—96,7)	100,0	100,0
Цитрат натрия	5,20±0,82	75,0 (47,7—92,5)	75,0	91,7	4,70±0,72	75,0 (47,7—92,5)	83,3	91,7
Этанол	4,25±0,48	91,7 (66,4—99,5)	91,7	100,0	4,25±0,36	83,3 (56,5—96,7)	100,0	100,0
Этилендиамин	4,38±0,30	83,3 (56,5—96,7)	100,0	100,0	3,87±0,30	91,7 (66,4—99,5)	100,0	100,0
ЭДТА	13,71±7,29	58,3 (32,0—81,5)	58,3	91,7	3,54±0,19	100 (78,2—100)	100,0	100,0
Эфедрин	3,17±0,14	100 (78,2—100)	100	100	3,5±0,43	91,7 (66,4—99,5)	91,7	100,0
Яблочнокислый натрий	6,25±0,89	58,3 (32,0—81,5)	58,3	91,7	5,20±0,68	66,7 (39,4—87,1)	83,3	91,7
Янтарная кислота	5,54±0,68	58,3 (32,0—81,5)	66,7	100,0	4,66±0,73	75,0 (47,8—92,5)	83,3	91,7

Таблица 11

Результаты применения различных терапевтических средств и статистическая обработка полученных данных

Вводимое вещество	Дозировка	Способ введения	Пол мышей	Погибло до облучения	После облучения через								
					5,5 дня			7,5 дня			10 дней		
					погибло	выжило	P	погибло	выжило	P	погибло	выжило	P
Анилид тиогликолевой кислоты	3 мг	вб	Самки	0	8	4	0,0781	10	2	0,0214	12	0	1,0000
Атропин	0,03 мг	пк	»	0	11	1	0,8295	12	0	1,0000	12	0	1,0000
Аценафтен	1 мг	вб	Самцы и самки	0	10	2	0,5111	10	2	0,0214	12	0	1,0000
Берберин	0,1 мг	вб	Самки	0	7	5	0,0200	8	4	0,0002	11	1	0,0385
Дезоксикортикостерон	1,5—2,0 мг	вб	Самцы	0	9	3	0,2313	12	0	1,0000	12	0	1,0000
Дрожжевой экстракт	4 мг	вб	Самцы и самки	0	12	0	1,000	12	0	1,0000	12	0	1,0000
Карбохолин	0,001, 0,002 мг	вб вв	Самки	0	11	1	0,8295	12	0	1,0000	12	0	1,0000
Лецитин	1—3 мг	вб	»	0	12	0	1,0000	12	0	1,0000	12	0	1,0000
Метилтестостерон	1 мг	вб	»	0	12	0	1,0000	12	0	1,0000	12	0	1,0000
Миоль	0,3 см³	вб	»	0	10	2	0,5111	11	1	0,2112	12	0	1,0000
Новокаин	1 мг	вб	»	1	6	6	0,0039	9	3	0,0022	10	2	0,0014
Печеночный экстракт	0,1 см³	вб	Самцы	0	9	3	0,2313	10	2	0,0214	11	1	0,0385
Пируват натрия	5 мг	вб	Самцы и самки	0	7	5	0,0200	10	2	0,0214	12	0	1,0000
Питуитрин	0,6 ЕД	вв	Самки	0	8	4	0,0781	10	2	0,0214	12	0	1,0000
Рибонуклеинат натрия	0,3 мг	вв, вб	»	0	9	3	0,2313	11	1	0,0212	12	0	1,0000
Селезеночный гомогенат	Из двух селезенок	вб	Самцы	0	11	1	0,8295	12	0	1,0000	12	0	1,0000
Стрептомицин	500 ЕД	пк	Самки	0	12	0	1,0000	12	0	1,0000	12	0	1,0000
Сулема	0,01 мг	вб	»	0	11	1	0,8295	12	0	1,0000	12	0	1,0000
Холестерин	2—3 мг	вб	Самцы	0	11	1	0,8295	12	0	1,0000	12	0	1,0000
Цистеин	15 мг	вб	Самцы и самки	0	10	2	0,5111	12	0	1,0000	12	0	1,0000

Таблица 12

Влияние различных веществ, вводимых после облучения, на смертность мышей, облученных дозой 1000 *r* γ-лучей

Вводимое вещество	Опыт				Контроль			
	Средняя продолжительность жизни (в днях)	% смертности через			Средняя продолжительность жизни (в днях)	% смертности через		
		5,5 дня	7,5 дня	10 дней		5,5 дня	7,5 дня	10 дней
Анилид тиогликолевой кислоты	5,0±0,55	66,7 (39,4—87,1)	83,3	100,0	4,12±0,42	91,7 (66,4—99,5)	91,7	100,0
Атропин	3,83±0,37	91,7 (66,4—99,5)	100,0	100,0	4,04±0,15	100 (78,2—100)	100,0	100,0
Аценафтен	4,46±0,54	83,3 (56,5—96,7)	83,3	100,0	3,75±0,26	100 (78,2—100)	100,0	100,0
Берберин	6,04±0,75	58,3 (32,0—81,5)	66,7	91,7	4,33±0,49	83,3 (56,5—96,7)	100,0	100,0
Дезоксикортикостерон	4,16±0,54	75,0 (47,7—92,5)	100,0	100,0	4,12±0,41	91,7 (66,4—99,5)	91,7	100,0
Дрожжевой экстракт	3,67±0,17	100 (78,2—100)	100,0	100,0	3,58±0,17	100 (78,2—100)	100,0	100,0
Карбохолин	3,12±0,46	91,7 (66,4—99,5)	100,0	100,0	3,75±0,21	100 (78,2—100)	100,0	100,0
Лецитин	3,54±0,20	100 (78,2—100)	100,0	100,0	3,66±0,42	91,7 (66,4—99,5)	100,0	100,0
Метилтестостерон	3,66±0,08	100 (78,2—100)	100,0	100,0	3,66±0,44	91,7 (66,4—99,5)	100,0	100,0
Миоль	4,79±0,48	83,3 (56,5—96,7)	91,7	100,0	3,25±0,21	100 (78,2—100)	100,0	100,0
Новокаин	6,09±0,94	50,0 (25,0—75,0)	75,0	83,0	3,91±0,18	100 (78,2—100)	100,0	100,0
Печеночный экстракт	4,62±0,76	75,0 (47,7—92,5)	83,3	91,7	4,20±0,42	91,7 (66,4—99,5)	91,7	100,0
Пируват натрия	5,33±0,63	58,3 (32,0—81,5)	83,3	100,0	3,66±0,45	91,7 (66,4—99,5)	91,7	100,0
Питуитрин	4,83±0,58	66,7 (39,4—87,1)	83,3	100,0	4,16±0,43	83,3 (56,5—96,7)	100,0	100,0
Рибонуклеинат натрия	4,54±0,57	75,0 (47,7—92,5)	91,7	100,0	3,83±0,18	100 (78,2—100)	100,0	100,0
Селезеночный гемогенат	4,58±0,29	91,7 (66,4—99,5)	100,0	100,0	5,12±0,49	66,7 (39,4—87,1)	100,0	100,0
Стрептомицин	3,45±0,16	100 (78,2—100)	100,0	100,0	4,12±0,41	91,7 (66,4—99,5)	91,7	100,0
Сулема	3,75±0,42	91,7 (66,4—99,5)	100,0	100,0	4,12±0,41	91,7 (66,4—99,5)	91,7	100,0
Холестерин	3,21±0,50	91,7 (66,4—99,5)	100,0	100,0	3,37±0,24	100 (78,2—100)	100,0	100,0
Цистеин	4,29±0,36	83,3 (56,5—96,7)	100,0	100,0	4,91±0,50	66,7 (39,4—87,1)	91,7	100,0

3. Опыты с меньшими дозами облучения

Итак, эксперименты подтвердили наши предположения, показав, что разные средства действительно обладают разным противолучевым «спектром». При этом мы хотим еще раз подчеркнуть, что рассматриваемые опыты носят сугубо ориентировочный и разведочный характер. Мы уверены, что проверка полученных результатов на большем материале внесла бы определенные коррективы в данные о действии отдельных веществ. Однако мы не сомневаемся в том, что общая картина, полученная в таких опытах, не отличалась бы существенно от той, которая описана выше.

Ввиду малого числа животных в отдельных группах и в связи с тем, что у нас еще мало данных о влиянии дозы облучения на локализацию во времени, выраженность и природу пиков смертности, возникают два вопроса. Во-первых, насколько надежны выводы, следующие из описанных выше «стандартных» опытов, и, во-вторых, насколько эти выводы можно экстраполировать на действие меньших доз облучения. Поэтому ниже мы рассмотрим результаты опытов по действию пяти противолучевых средств на смертность мышей, подвергавшихся облучению в меньших дозах. Материал взят из наших опытов по изучению противолучевого действия эстрогенов (Куликова, Лучник, Тимофеев-Ресовский и Тимофеева-Ресовская, 1957), цистеина [1] дрожжевых экстрактов [2], тиомочевины и атропина (Лучник, не опубликовано), поэтому здесь нет надобности описывать эти опыты подробно. Мы остановимся только на влиянии данных средств на пики смертности. В сжатой форме результаты этих опытов представлены в табл. 13, из которой видно, что все описываемые вещества снижают смертность мышей от облучения.

Таблица 13

Влияние разных противолучевых средств на смертность мышей, облученных дозами 500—700 *r*

Вводимое вещество	Число мышей	Погибло к 20-му дню		Разница
		число	%	
Цистеин	118	50	$42{,}3 \pm 4{,}55$	
Контроль	118	84	$71{,}2 \pm 4{,}17$	$28{,}9 \pm 6{,}18$
Тиомочевина	117	76	$64{,}2 \pm 4{,}43$	
Контроль	117	94	$80{,}3 \pm 3{,}67$	$16{,}1 \pm 5{,}76$
Эстрогены	106	43	$40{,}6 \pm 4{,}76$	
Контроль	106	84	$79{,}2 \pm 4{,}06$	$38{,}6 \pm 6{,}26$
Атропин	120	56	$46{,}7 \pm 4{,}56$	
Контроль	120	72	$60{,}0 \pm 4{,}47$	$13{,}3 \pm 6{,}39$
Дрожжевой экстракт	219	130	$59{,}4 \pm 3{,}31$	
Контроль	346	257	$74{,}3 \pm 2{,}35$	$14{,}9 \pm 4{,}06$

Приведенные цифры не вполне показательны в отношении эффективности данных средств, так как рассматриваемые группы являются сборными — в них входят животные разных штаммов, получавшие неодина-

[1] Н. В. Лучник и Е. М. Тимофеева-Ресовская. Лучевые поражения и воздействие на них. Влияние цистеина и некоторых других веществ, содержащих серу, на эффект облучения мышей, крыс и гороха. (См. настоящий сборник).

[2] Н. В. Лучник. Лучевые поражения и воздействие на них. VI. Действие дрожжевых экстрактов на смертность облученных мышей и на проростки гороха. (См. настоянастоящий сборник).

ковое количество веществ не в одно и то же время и в разных условиях. Однако в данном случае более важно то, что контрольные группы состоят из таких же животных, как и опытные; облучение опытных и контрольных животных в большинстве случаев производилось одновременно.

Прежде чем приступить к анализу полученных данных, вспомним, какие результаты дало использование этих веществ в основном опыте. Цистеин и эстрогены действуют неспецифически и снижают по крайней мере три первых пика. Тиомочевина не снижает первого пика, а снижает второй. Атропин и дрожжевой экстракт не оказывают заметного эффекта на ранние пики.

Обратимся теперь к опытам по действию малых доз облучения. Весь этот материал, приведенный в табл. 13, был обработан таким образом, что для каждого дня t после облучения вычислялась величина P_t по следующей формуле:

$$P_t = \frac{a_t}{N - \sum_{i=1}^{t-1} a_i},$$

где a_t — число животных, погибающих в течение i-тых суток, N — общее число животных в опыте.

На рис. 3 изображены пики смертности для всех опытных и соответствующих контрольных групп. Такой способ изображения наиболее непосредствен, но обладает тем недостатком, что при нем трудно судить об относительном снижении смертности. Поэтому на рис. 4 те же данные представлены в несколько иной форме: для каждого дня величина P опыта выражена в процентах P_t контроля. Подобный способ графического изображения также не свободен от недостатков, так как преувеличивает отклонения в плюс-сторону (что несколько сглаживается полулогарифмическим масштабом) и не дает возможности изображать точки при контрольной смертности, равной нулю. Более ясное представление можно получить, сопоставив тот и другой способ изображения.

Рассмотрение этих рисунков убеждает в том, что результаты, полученные на большом количестве мышей при дозах ЛД 70—80/20, находятся в очень хорошем соответствии с результатами «основных» опытов с малыми группами животных при дозе облучения 1000 *r*. Цистеин и эстрогены оказались действительно «универсальными» противолучевыми средствами. Хотя их противолучевой «спектр» и не идентичен (эстрогены дают максимальный эффект около 15-го дня после облучения, т. е. тогда, когда цистеин дает минимальный эффект), но оба средства снижают смертность на протяжении всего опыта (начальное повышение смертности при введении цистеина, вероятно, нереально). Относительно тиомочевины предварительный вывод оказался правильным, но не вполне точным: по-видимому, она несколько снижает и первый пик, но этот эффект перекрывается высокой смертностью в еще более ранние сроки. Интересно отметить сходство противолучевых «спектров» двух серусодержащих веществ: цистеина и тиомочевины. Что касается неэффективности дрожжевого экстракта и атропина при ранней смертности, то и этот вывод оказался правильным. Опыты на большом материале позволяют внести лишь некоторые уточнения. Дрожжевой экстракт действует и на второй пик, но это действие перекрывается отрицательным влиянием на первый пик, которое при дозе 1000 *r* должно быть очень значительным. Интересно отметить резкое различие «спектров» дрожжевого экстракта и атропина — двух терапевтических средств, снижающих поздние пики. Это различие позволяет надеяться, что в результате систематических исследований удастся найти средства, действующие на любой

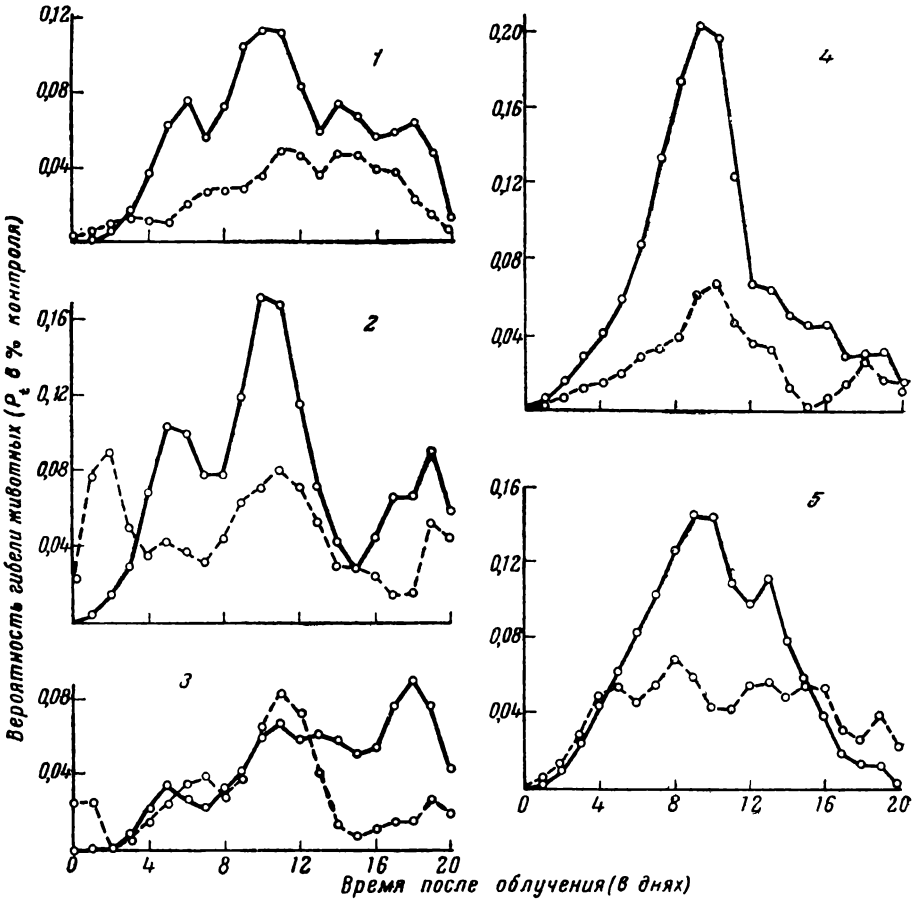


Рис. 3. Пики смертности при введении облученным мышам различных противолучевых средств (штриховые линии) и в контроле (сплошные линии)

1 — цистеин; *2* — тиомочевина; *3* — атропин; *4* — эстрогены; *5* — дрожжевой экстракт

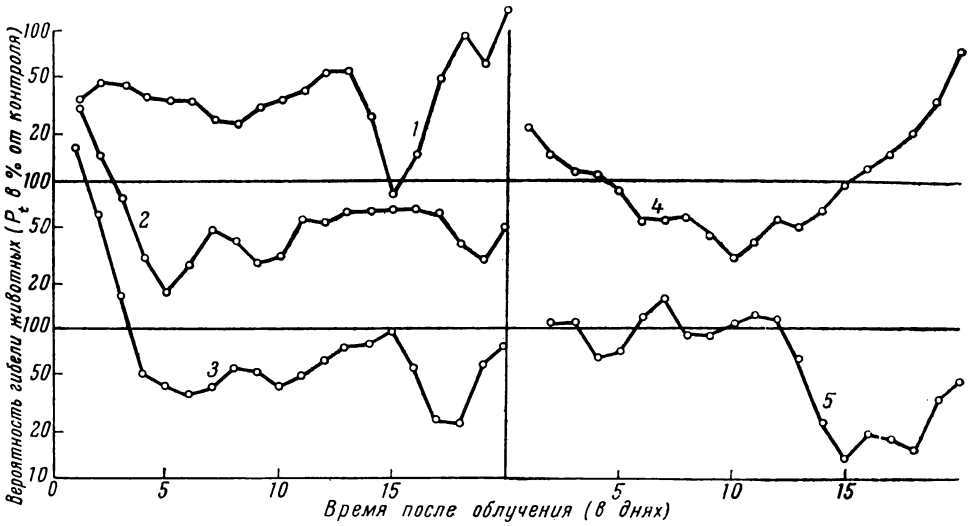


Рис. 4. Относительное снижение пиков смертности при введении облученным мышам разных веществ (подробности в тексте)

1 — эстрогены; *2* — цистеин; *3* — тиомочевина; *4* — дрожжевой экстракт *5* — атропин;

пик как среди защитных, так и среди более редких, однако практически более важных терапевтических веществ, что послужит основой для разработки эффективных методов комплексного лечения лучевой болезни.

Произведенное выше сопоставление доказывает целесообразность исследований, подобных нашему «основному» опыту. Несмотря на очень жесткие условия опыта (как в смысле числа животных, так и в отношении дозы облучения), в ходе его удалось получить вполне убедительные данные при широте охвата противолучевых средств, невозможной при обычном планировании опытов.

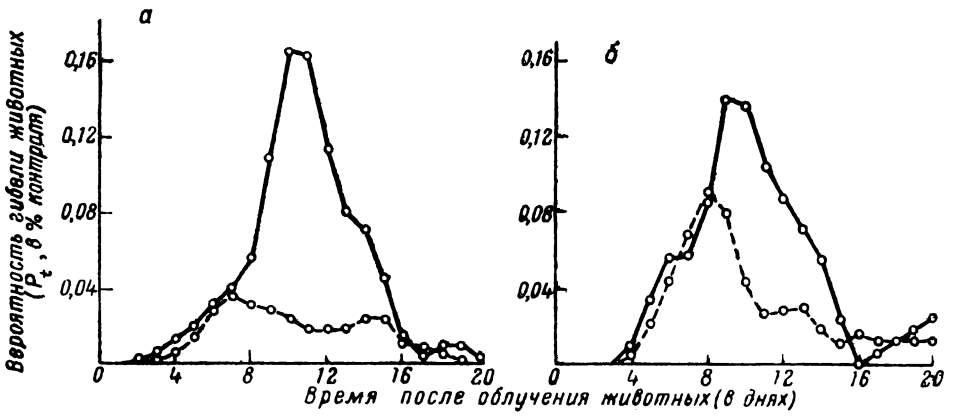


Рис. 5. Пики смертности при введении облученным мышам диэтилстильбэстрола (*а*) и костного мозга (*б*). Штриховая линия — опыт, сплошная линия — контроль (по данным Н. И. Шапиро и сотрудников)

В этой связи представляло бы чрезвычайный интерес сопоставление большего числа данных, полученных разными авторами в отношении действия противолучевых средств на пики смертности. К сожалению, пригодных для этого данных существует немного, так как большинство авторов не указывает в своих работах смертность на каждый день после облучения. В дальнейшем мы имеем в виду собрать и обработать весь имеющийся материал, здесь же ограничимся только анализом некоторых данных, полученных в Институте биофизики АН СССР, а именно — данных по влиянию на смертность облученных мышей диэтилстильбэстрола (Шапиро, Нуждин и Кузин, 1955) и суспензии костного мозга (Шапиро, Нуждин, Волкович и Колодий, 1955), так как мы считаем, что механизм противолучевого действия дрожжевых экстрактов и препаратов костного мозга сходен.

Результаты обработки этих данных приведены на рис. 5, ознакомление с которым позволяет заметить, что кривая для диэтилстильбэстрола наиболее напоминает кривую, полученную нами для эстрогенов, а кривая для костного мозга — таковую для дрожжевого экстракта. Единственное существенное отличие то, что в опытах Шапиро и сотрудников диэтилстильбэстрол оказал противолучевое действие не в течение всего опыта, а только начиная с 8-го дня, что противоречит нашим данным о воздействии эстрогенов на первый пик.

Однако в другой работе тех же авторов (Шапиро, Кузин и Нуждин, 1955) приводятся данные по облучению мышей, получавших диэтилстильбэстрол при более высокой дозе облучения — 700 *г*. В этих условиях диэтилстильбэстрол не влиял на смертность животных. Очевидно, что указанные авторы работали на другом материале, который несколько иначе реагировал на облучение, чем материал, с которым работали мы.

ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ

Описываемые в этой работе опыты преследовали в основном три цели. Во-первых, проверить правильность предположения о том, что пики смертности являются отражением разных конечных причин гибели облученных животных. Во-вторых, попытаться выделить из большого числа известных противолучевых средств такие, которые снижали бы первый пик. И, наконец, в-третьих, несколько детализировать классификацию противолучевых средств.

В табл. 14 приведены в сжатой форме данные о влиянии различных веществ на первый и второй пики. Для краткости мы перечисляем в ней только средства, давшие реальный положительный эффект. Способ статистической обработки данных по второму пику был несколько иной, чем выше, когда сравнивались результаты по общей смертности через 7,5 дня. Строго говоря, это сравнение указывает на реальность влияния вещества на суммарный эффект первого и второго пиков. В данном же случае мы, для того чтобы выяснить влияние изучаемых веществ на второй пик, сравниваем, по совету А. А. Ляпунова, число животных, проскочивших второй пик, не по отношению к исходному количеству, а по отношению к числу животных, остающихся в живых по прошествии первого пика. Если первый способ указывает вероятность «проскока» через первый и второй пики, то второй — вероятность избирательного «проскока» через второй пик, не зависящую от влияния данного средства на первый пик. Как и в первом случае, точные вероятности вычислялись путем разложения соответствующих биномов. Сравнение полученных результатов с данными, приведенными в табл. 7, 9 и 10, показывает почти полную их тождественность. Из 27 случаев реального «двойного проскока» в 22 оказалось, что реален и избирательный «проскок» через второй пик. Следовательно, вероятность «двойного проскока» зависит главным образом от вероятности «проскока» через второй пик. Уже это сопоставление свидетельствует о том, что действие противолучевых средств на смертность в разные сроки после облучения происходит независимо, что подтверждает взгляд на пики смертности как на отражение разных конечных причин гибели облученных животных.

На избирательность противолучевого действия разных веществ указывает также сравнение «спектров противолучевого действия» при разных доверительных вероятностях (табл. 15). Из таблицы видно, что с уменьшением доверительной вероятности резко падает число «универсальных веществ» при отсутствии систематического смещения в отношении избирательности какому-либо определенному пику.

Небезынтересно и распределение веществ по группам в зависимости от времени их введения и от того, на какие пики они влияют.

Из табл. 16 видно, что подобное распределение веществ не случайно. Так, все профилактические воздействия (применявшиеся за 10 дней до облучения) оказали влияние на оба пика. Из 15 защитных и терапевтических средств, снизивших первый пик, 8 имеют отношение к циклу Кребса; из 11 веществ, избирательно действующих на второй пик, 7 оказались аминокислотами или веществами, содержащими серу. Это также показывает, что действие определенных средств на те или иные пики связано с механизмом их противолучевого действия.

Если теперь обратиться к первому пику, то рассмотрение результатов наших опытов, а также имеющихся литературных данных говорит о большом значении первого пика при летальном действии ионизирующих лучей на млекопитающих. При облучении мышей в дозах от 1000 и, по крайней мере, до 10 000 *r* гибель животных происходит в основном в этот пик. Принципиально та же картина наблюдается при действии рентгеновских

Таблица 14

Снижение первого и второго пика смертности под действием разных противолучевых средств

Применяемое воздействие	1-й пик			2-й пик		
	сжило	проскочило	P	дожило	проскочило	P
А. Введение за 10 дней до облучения						
Диэтилстильбэстрол	12	11	<0,001	11	10	<0,001
Предварительное облучение	12	6	<0,01	6	4	<0,01
Фолликулин	10	8	<0,001	8	5	<0,01
Эмбихин	10	8	<0,001	8	5	<0,01
Б. Введение непосредственно перед облучением						
Аланин	12	2	—	2	2	<0,05
Анилид тиогликолевой кислоты	12	3	—	3	2	<0,05
Аценафтен	8	4	<0,05	4	0	—
Берберин	12	5	<0,05	5	3	<0,05
Гидросульфит	12	3	—	3	3	<0,01
Гипосульфит	12	3	—	3	2	<0,05
Гликоколл	12	3	—	3	2	<0,05
Глюкоза	8	4	<0,05	4	0	—
Кофеин	12	3	—	3	2	<0,05
Лизин	12	7	<0,001	7	0	—
Лошадиная сыворотка	11	5	0,05	5	1	—
Пируват	12	10	<0,001	10	6	<0,01
Серин	12	2	—	2	2	<0,05
Стрихнин	5	4	<0,01	4	2	<0,1
Тиомочевина	11	4	<0,1	4	3	<0,01
Уксуснокислый натрий	12	5	<0,05	5	1	—
Цистеин	11	5	<0,05	5	2	—
Цитрат	12	3	—	3	3	<0,01
Этилендиаминтетраацетат	12	5	<0,05	5	5	<0,001
Яблочнокислый натрий	12	5	<0,05	5	5	<0,001
Янтарная кислота	12	5	<0,05	5	4	<0,01
В. Введение после облучения						
Анилид тиогликолевой кислоты	12	4	<0,01	4	2	<0,1
Аценафтен	12	2	—	2	2	<0,05
Берберин	12	5	<0,05	5	4	<0,01
Новокаин	11	6	<0,01	6	3	<0,05
Печеночный экстракт	11	3	—	3	2	<0,05
Пируват	12	5	<0,05	5	2	—
Питуитрин	12	4	<0,1	4	2	<0,1
Контроль	300	41	—	41	5	—

Примечание. Прочерк стоит в тех случаях, когда $P>0{,}1$.

и γ-лучей, а также α-лучей и нейтронов и не только на мышах, но и на крысах, морских свинках, хомяках, козах, свиньях и собаках (Bonet-Maury et Patti, 1950; Rajevsky, 1955; Bond, Silverman a. Cronkite, 1954). В ряде опытов по местному облучению и экранированию выяснено, что гибель в первый пик происходит в результате облучения тонкого кишечника (Quastler, Lanzl, Keller a. Osborne, 1951; Rajevsky, 1955).

Таблица 15

Распределение противолучевых средств по их избирательности при разных доверительных вероятностях

Снижаемые пики	Доверительная вероятность			
	0,1	0,05	0,01	0,001
1-й	7	8	3	4
2-й	10	11	7	2
1-й и 2-й	15	11	5	1
Всего	32	30	15	7

Таблица 16

Распределение противолучевых средств по времени применения и избирательности действия

Время применения	Снижаемые пики		
	1-й	2-й	1-й и 2-й
За 10 дней до облучения	—	—	Диэтилстильбэстрол Предварительное облучение Фолликулин Эмбихин
Непосредственно перед облучением	Аценафтен Глюкоза Лизин Лошадиная сыворотка Стрихнин Уксусная кислота Цистеин	Аланин Анилид ТГК Гидросульфит Гипосульфит Гликоколл Кофеин Серин Тиомочевина Цитрат	Берберин Пируват ЭДТА Яблочная кислота Янтарная кислота
После облучения	Пируват	Аценафтен Печеночный экстракт	Берберин Новокаин

Смертность в первый пик мало зависит от особенностей подопытных животных и плохо поддается фармакологическим воздействиям. В наших опытах из 80 средств, противолучевые свойства большинства из которых хорошо известны, только 8 избирательно снизили первый пик и 11 — два первых пика.

Интересно, что многие из веществ, снижающих первый пик, снижают также и второй. Таковыми оказались все эффективные профилактические средства (диэтилстильбэстрол, предварительное облучение, фолликулин и эмбихин).

Из остальных веществ, эффективных в отношении первого пика, обращает на себя внимание большое число веществ, имеющих отношение к циклу Кребса. Два вещества — стрихнин и новокаин — известны в фар-

макологии как действующие преимущественно на центральную нервную систему. Что же касается остальных веществ, снизивших первый пик,— аценафтена, глюкозы, лизина и ЭДТА, то их трудно сгруппировать по общим признакам.

Намерение испытать в опытах по облучению мышей некоторые вещества, имеющие отношение к циклу Кребса, появилось у нас после того, как Бак и Эрв (Bacq et Herve, 1952) открыли, что цистеамин превосходит по своему защитному действию цистеин. Поскольку цистеамин представляет собой часть молекулы коэнзима А (СаА), то казалось вероятным, что противолучевой эффект цистеамина, цистеина, глютатиона и сходных веществ объясняется специфической защитой СоА от действия облучения. Что же касается самого СоА, то ряд данных об этом веществе (Lipman, 1953) говорит в пользу предположения, что биологическое действие облучения в какой-то мере связано с его действием на этот коэнзим. В наших опытах помимо цистеина первый пик снизили некоторые участники цикла Кребса — пируват натрия, яблочнокислый натрий, янтарная кислота и ацетат; что же касается этого цикла, то в последнее время выяснена ведущая роль СоА в его осуществлении. Мы склонны предположительно объяснять также и действие берберина его возможным влиянием на СоА (Hirsch, 1952; Mahler, 1953).

Помимо стрихнина и новокаина, достоверно снизивших первый пик, в наших опытах были применены и другие нейротропные вещества — гистамин, уретан, атропин, карбохолин, адреналин, гексенал, кофеин, морфин, этанол, эфедрин, и ни одно из них не снизило первого пика. Сходный эффект стрихнина и новокаина может показаться парадоксальным, так как эти вещества оказывают в значительной мере противоположное действие на центральную нервную систему. Однако стрихнин вводился нами в очень высокой дозировке, вызывавшей гибель половины животных; при этом после нескольких судорожных движений животные становились малоподвижными, а иногда даже парализованными. Введение же меньших дозировок стрихнина не оказало никакого влияния на смертность облученных мышей.

Этот факт позволяет сделать вывод, что угнетение центральной нервной системы может иногда несколько снизить смертность животных за счет первого пика. При этом другие вещества, угнетающие центральную нервную систему (уретан, гексенал, морфин, этанол), не влияли на смертность облученных животных. Поэтому можно думать, что у мышей при примененной дозе облучения поражение нервной системы играет второстепенную роль при ранней смертности. Не исключено, однако, что поражение нервной системы играет значительно более важную роль в осуществлении других пиков, а также при ранней смертности у других видов животных. В пользу такого предположения говорят опыты Никитина и Максимчук (1934), с успехом применявших наркоз для снятия ранней смертности у кроликов, облученных относительно невысокими дозами. У мышей поражение нервной системы, по-видимому, играет ведущую роль при облучении дозами порядка десятков и сотен тысяч рентген.

Глюкоза, также снизившая первый пик, была применена в связи с тем, что многие авторы употребляли для борьбы с лучевой болезнью гипертонические растворы, приписывая существенную роль в патогенезе этого недуга нарушениям водно-солевого баланса. Из подобных средств, а также средств, действующих на сосудистую систему, мы испытали, помимо глюкозы растворы желатина и хлористого кальция, адреналин и питуитрин, причем они не дали реального эффекта. Поэтому положительному действию глюкозы мы вообще не склонны приписывать серьезного значения, тем более что соответствующий опыт был поставлен всего на 8 животных (4 погибли во время инъекции).

Никакого эффекта не дали в наших опытах и витаминные препараты. Применялись: аскорбиновая кислота, кобаламин, ниацин, пиридоксин, рибофлавин, танин, тиамин, фолиевая кислота, камполон, дрожжевой и печеночный экстракты; во всех случаях результаты были отрицательными. Конечно, эти данные не исключают возможной пользы витаминотерапии при лучевой болезни, но они ясно показывают неспособность витаминов повлиять на процессы, вызывающие смертность мышей в первый пик. То же следует сказать о воздействиях на обмен гистамина (иммунизация гистамином или введение в день облучения димедрола), о введении холестерина и лецитина, о применении антибиотиков (стрептомицин), о тканевых препаратах (гомогенат селезенки, дрожжевой экстракт, печеночный экстракт, миоль).

Некоторые широко известные защитные вещества, такие, как цианистый калий, этиловый спирт, нитрит натрия и другие, оказались в наших опытах неэффективными. Это можно объяснить либо неэффективностью этих средств против первого пика, либо тем, что их защитный эффект количественно слишком слаб для того, чтобы его можно было уловить в опытах, поставленных на малом числе животных.

Заканчивая краткий обзор действия на первый пик основных групп испытанных веществ, нужно прежде всего сказать, что результаты наших опытов наиболее интересны при рассмотрении их в совокупности с точки зрения проверки теории пиков. Что же касается действия конкретных веществ на первый, а тем более на второй пик, то полученные цифры следует рассматривать только как ориентировочные. Тем не менее уже можно с достаточной определенностью говорить о действии на первый пик некоторых профилактических (иммунизирующих) средств, а также ряда веществ, имеющих отношение к циклу Кребса. Сравнительное изучение 80 различных воздействий заставляет прийти к выводу, что первый пик с трудом поддается фармакологическим воздействиям.

Полученный материал позволяет также детализировать классификацию противолучевых средств, основы которой были предложены раньше (Тимофеев-Ресовский и Лучник, 1957). Эта классификация строится на феноменологическом принципе и в первую очередь исходит из временного оптимума применения противолучевых средств. При этом все противолучевые средства распадаются на четыре типа: профилактические, или средства, эффективные при введении в организм за несколько дней до облучения; защитные, эффективные при введении в организм непосредственно перед облучением; терапевтические, или средства, оказывающие эффект только при наличии их в ткани или окружающей среде во время облучения; фоновые средства, которые должны присутствовать в организме в течение длительного времени. Наряду с этим давно уже предпринимались вполне оправданные попытки объединения противолучевых средств в группы по их химическим и фармакологическим свойствам. Однако этот путь не столь надежен, так как общефармакологические и химические свойства веществ далеко не всегда коррелируют с противолучевыми. Тем не менее, на наш взгляд, химические и фармакологические аналогии могут служить для более детальной классификации средств внутри четырех основных типов.

Анализ действия противолучевых средств на пики смертности является средством для дальнейшей классификации противолучевых средств внутри четырех основных типов. Ниже мы попытаемся сделать это. При этом наряду с временным оптимумом апликации и действием на пики смертности будут частично привлечены и некоторые другие соображения. Предлагаемая система, как бы схематична она на первых порах ни была, нужна в качестве базы для дальнейшей работы по систематизации уже известных средств и по изысканию новых.

К первому типу — профилактическим средствам, эффективным при введении их в организм за несколько дней до облучения, относится в настоящее время сравнительно небольшое число воздействий, большинство из которых было испытано в описанных выше опытах; эти же средства были испытаны нами и при меньших дозах облучения (Куликова, Лучник, Тимофеев-Ресовский и Тимофеева-Ресовская, 1957). Для всех известных средств этого типа характерно то, что они действуют на несколько пиков, и в том числе на первый. По нашим данным, эстрогенные гормоны и их аналоги обладают более широким спектром противолучевого действия. Поэтому их можно выделить в отдельную подгруппу. Сейчас трудно сказать, возможно ли существование профилактических средств, действующих более избирательно, чем известные до сих пор. Ответ на этот вопрос могут дать только дальнейшие эксперименты.

К воздействиям второго типа — защитным — мы относим противолучевые средства, которые эффективны лишь при введении в организм непосредственно перед облучением. Здесь в отличие от профилактических средств мы сталкиваемся со значительно более пестрой картиной. Среди защитных веществ можно выделить группу средств «универсального» действия, снижающих большое число пиков смертности. Из числа последних напрашивается вычленение в отдельную группу средств, влияющих предположительно на выход активных радикалов; сюда относятся аноксия и различные физические и химические воздействия, снижающие содержание кислорода в ткани. Из прочих средств с широким «спектром» действия можно выделить в отдельную группу только вещества, имеющие отношение к циклу Кребса. Защитные вещества, не влияющие на первый пик, пока можно разделять только по химическим и фармакологическим признакам. Так, можно выделить в отдельные группы серусодержащие вещества, аминокислоты, одно- и многоатомные спирты, амины.

К средствам третьего типа — терапевтическим, т. е. эффективным при применении после облучения, также относятся разнообразные вещества, среди которых мы почти не находим средств с широким «спектром». Пока мы объединяем в один класс все средства, действующие на первый пик, вне зависимости от того, как они влияют на более поздние пики. В дальнейшем этот класс должен быть разделен на два: вещества с широким спектром и вещества, избирательно снижающие первый пик. Среди терапевтических средств, не влияющих на первый пик, но эффективных при меньших дозах облучения, уже сейчас можно наметить группу нуклеиновых кислот и тканевых препаратов, богатых нуклеиновыми кислотами, и группу антибиотиков.

Поскольку фоновые вещества не применялись в наших опытах, мы пока не подразделяем их на более мелкие группы.

Такова предлагаемая нами классификация противолучевых средств. Ее следует рассматривать, конечно, в качестве самой предварительной рабочей схемы, так как до сих пор почти отсутствуют достаточно широкие сравнительные исследования противолучевых средств. В этой связи нам кажется необходимым в первую очередь изучить воздействие большого числа противолучевых средств на поздние пики смертности, а также сравнить их действие на организмах разных видов.

ВЫВОДЫ

1. Целью настоящей работы являлось сравнительное изучение большого числа противолучевых средств на мышах, главным образом с точки зрения проверки теории пиков (Лучник, 1957). Всего испытано 80 воздействий, применявшихся за 10 дней до облучения в дозе 1000 *r* γ-лучей, непосредственно перед ним или после него.

2. В связи с разработкой стандартной методики опытов была подробно исследована реакция на облучение контрольных мышей. Такие факторы, как штамм животных, их пол и возраст, мало влияют на эффект облучения высокими дозами. Среди мышей штамма «Н», облученных дозой 1000 *r*, 84,7% погибают в первый пик (т. е. в течение 5,5 дней), 13,7% во второй и 1,6% в третий пик.

3. При применении за 10 дней до облучения диэтилстильбэстрол, предварительное облучение, фолликулин и эмбихин реально снизили первый и второй пик смертности облученных мышей.

4. При введении непосредственно перед облучением аценафтен, глюкоза, лизин, лошадиная сыворотка, стрихнин, уксуснокислый натрий и цистеин избирательно снизили первый пик; аланин, анилид тиогликолевой кислоты, гидросульфит, гипосульфит, гликоколл, кофеин, серин, тиомочевина и цитрат натрия — второй; а берберин, пируват натрия, ЭДТА, яблочнокислый натрий и янтарная кислота снизили оба пика.

5. При введении после облучения пируват натрия снизил первый пик смертности, аценафтен и печеночный экстракт — второй, а берберин и новокаин — оба пика.

6. В опытах с меньшими дозами облучения и на большем материале проанализировано действие на пики смертности эстрогенов, цистеина, дрожжевого экстракта, тиомочевины и атропина. Полученные результаты находятся в соответствии с выводами, полученными в основных опытах.

7. Отдельные противолучевые средства избирательно действуют на разные пики. Этот факт указывает, что пики смертности служат отражением разных конечных причин гибели облученных животных..

8. Первый пик с трудом поддается фармакологическим воздействиям. С достаточной определенностью пока можно говорить только о возможности понижения первого пика при общем повышении резистентности при помощи приемов, аналогичных иммунизации, и путем воздействия на цикл Кребса.

9. В заключение обсуждаются основы классификации противолучевых средств.

ЛИТЕРАТУРА

Ковалевский К. М. Лабораторное животноводство. М., Медгиз, 1951.

Куликова В. Г., Лучник Н. В., Тимофеев-Ресовский Н. В. и Тимофеева-Ресовская Е. А. Лучевые поражения и воздействия на них. III. Влияние введения чужеродных сывороток, некоторых гормонов и предварительного облучения на эффект последующего облучения мышей. Тр. Ин-та биол. УФАН СССР, вып. 9. Свердловск, 1957.

Лучник Н. В. Лучевые поражения и воздействие на них. II. Зависимость смертности облученных мышей и крыс от дозы облучения, пола, веса и штамма животных и распределение этой смертности во времени. Тр. Ин-та биол. УФАН СССР, вып. 9. Свердловск, 1957.

Никитин С. А. и Максимчук Е. П. Опыт по купированию рентгеношока. Тр. Одесского государственного рентгено-онкологического ин-та. Одесса, вып. 2, 1934, стр. 77.

Шапиро Н. И., Кузич А. М. и Нуждин Н. Н. Роль физиологического состояния организма при использовании защитных средств от повреждающего действия проникающих излучений. Сб. работ по радиобиологии. М., Изд-во АН СССР, 1955, стр. 51—59.

Шапиро Н. И., Нуждин Н. Н. и Кузин А. М. Действие эстрогенных веществ на лучевую реакцию мышей. Сб. работ по радиобиологии. М., Изд-во АН СССР, 1955, стр. 16—50.

Шапиро Н. И., Нуждин Н. Н., Волкович М. А. и Колодий Е. Н. К вопросу о роли повреждения кроветворных органов в ходе лучевой реакции. Сб. работ по радиобиологии. М., Изд-во АН СССР, 1955, стр. 60—82.

Тимофеев-Ресовский Н. В. и Лучник Н. В. Лучевые поражения и воздействие на них. I. О классификации возможных путей воздействия на общий эффект облучения. Тр. Ин-та биол. УФАН СССР, вып. 9. Свердловск, 1957.

Abrams H. L. Influence of age, body weight and sex on susceptibily of mice to the lethal effects of X-radiation. Proc. Soc. Exptl. Biol. a. Med., 1951, vol. 76, p. 729.
Bacq Z. M. et Herve A. Protection chimique contre le rayonnement X. Bull. Acad. Roy. Med. Belg., 1952, vol. 17, p. 13.
Bond V. P., Silverman H. S. a. Cronkite E. P. Patogenesis and pathology of post-irradiation infection. Rad. Res., 1954, vol. 1, p. 389.
Bonet-Maury P. et Patti F. L'irradiation mortelle de la souris par les rayons X et γ. Essais thérapeutiques. J. Radiol. Electrol., 1950, vol. 31, p. 286.
Clark W. a. Uncapher R. Dosage-mortality in rats given total-body roentgen irradiation. Proc. Soc. Exptl. Biol. a. Med., 1949, vol. 71, p. 214.
Ellinger F. Die Histaminhypothese der biologische Strahlenwirkunge. Schweiz. med Wchschr., 1951, Bd. 3, S. 61.
Feldberg W. u. Schilf E. Histamin. Seine Pharmakologie und Bedeutung für die Humoralphysiologie. Berlin, 1930.
Hirsch H. H. Das Angriffspunkt von Berberine in der Zelle. Z. Krebsferschg., 1952, Bd. 58, S. 504.
Lipman F. On chemistry and function of coenzyme. A. Bacteriol. Rev., 1953, vol. 17, p. 1.
Mahler H. R. Butyryl coenzyme A-dehydrogenase, a cuproflavoprotein. J. Am. Chem Soc., 1953, vol. 75, p. 3288.
Patt H. M. Protective mechanisms in ionizing radiation injury. Physiol. Rev., 1953, vol. 33, p. 35.
Quastler H., Lanzl E. F., Keller M. E. a. Osborne J. W. Acute intestinal radiation death. Am. J. Physiol., 1951, vol. 164, p. 546.
Rajewsky B., Heuse O. u Aurand K. Weitere Untersuchungen zum Problem Ganzkörperbestrahlung der weissen Maus. Z. Naturforschg., 1953, Bd. 8b, S. 157 u. 524.
Rajewsky B. Radiation death in mammals. Radiobiol. Symp. Liège. London, Butterworth Co, 1955, p. 81.
Selye H. Stress. Acta. Montreal, 1950.

А К А Д Е М И Я Н А У К С С С Р
У Р А Л Ь С К И Й Ф И Л И А Л

Вып. 12 ТРУДЫ ИНСТИТУТА БИОЛОГИИ 1960

Н. В. ЛУЧНИК и Е. А. ТИМОФЕЕВА-РЕСОВСКАЯ

ЛУЧЕВЫЕ ПОРАЖЕНИЯ И ВОЗДЕЙСТВИЕ НА НИХ

V. ВЛИЯНИЕ ЦИСТЕИНА И НЕКОТОРЫХ ДРУГИХ ВЕЩЕСТВ, СОДЕРЖАЩИХ СЕРУ, НА ЭФФЕКТ ОБЛУЧЕНИЯ ЖИВОТНЫХ И РАСТЕНИЙ

ВВЕДЕНИЕ

На биологический эффект облучения можно воздействовать разными способами, обсуждавшимися в первом сообщении этой серии (Тимофеев-Ресовский и Лучник, 1957). При современных знаниях о механизмах биологического действия излучений можно наметить три принципиально различных пути воздействия на вредные биологические эффекты радиации. Во-первых, можно тем или иным способом повысить общую резистентность организма или, другими словами, «иммунизировать» его против лучевого поражения. Это достигается, например, предварительным облучением или путем введения за несколько дней до облучения чужеродных белков или некоторых гормонов (Куликова, Лучник, Тимофеева-Ресовская и Тимофеев-Ресовский, 1957). Во-вторых, можно воздействовать на ход уже идущего патологического процесса. Это достигается, в частности, введением после облучения антибиотиков (Miller, Hammond a. Tompkins, 1950) или некоторых тканевых препаратов (Jacobson, 1952; Лучник, 1957). Наконец, можно, воздействуя непосредственно перед облучением, пытаться снизить степень первичного лучевого поражения.

При внешнем облучении количество абсорбированной энергии можно уменьшить только тривиальными путями, не имеющими отношения к биологической защите от облучения, например при помощи экранирования. Что же касается выхода первичных продуктов реакции, то здесь открываются интересные возможности. Общеизвестно, что биологическое действие излучений связано не только с непосредственной ионизацией биологически важных молекул и структур, но также с возникновением высокоактивных химических продуктов, в частности свободных радикалов, образующихся при радиолизе воды. Из радиационной химии мы знаем, что выход этих продуктов сильно зависит от сопутствующих условий, таких, как присутствие кислорода, pH среды, наличие определенных примесей. Когда мы в 1948 г. начали поиски противолучевых средств, перечисленные факты были уже известны. Особенно интересными казались с биологической точки зрения опыты, установившие при облучении растворов энзимов защитное действие сульфгидрильных соединений (Barron a. Dickman, 1949). Поэтому было естественным испытать действие подобных ве-

ществ при облучении живых организмов. Для этих опытов мы избрали цистеин как вещество достаточно простое, нетоксичное и присутствующее в норме в организме. После первых опытов на крысах, показавших, что цистеин превосходит по силе своего защитного действия все испытанные нами до того вещества, было решено заняться его систематическим изучением на разных объектах.

Нет ничего удивительного в том, что в 1949—1950 гг. ряд авторов, руководствуясь такими же соображениями, начали независимо друг от друга аналогичные опыты. Вскоре вышло из печати большое число работ, посвященных подробному изучению действия цистеина и родственных ему веществ на облученных мышей и крыс. Поэтому в дальнейшем мы концентрировали внимание лишь на тех сторонах проблемы, которые, несмотря на свою важность, остались слабо изученными; это в первую очередь относится к влиянию цистеина на цитологические эффекты облучения.

Ниже описаны наши первые опыты [1] на крысах, облученных рентгеновскими лучами, доказавшие наличие у цистеина сильно выраженного защитного эффекта. Затем идут опыты с γ-лучами, поставленные на мышах, после чего будут даны опыты главным образом цитологические, проведенные на растительном материале.

МАТЕРИАЛ И МЕТОДИКА

Как уже было сказано, подопытными объектами служили белые крысы, мыши нескольких штаммов и горох. Облучение производилось рентгеновскими лучами или γ-лучами радиокобальта.

Опыт ставился на взрослых крысах, весивших 200—250 г. Для облучения рентгеновскими лучами они помещались в алюминиевые цилиндры, которые медленно вращались для обеспечения более равномерного облучения. Облучение производилось при 170 kV, 15 mA, фильтр 0,5 мм меди и 1,0 мм алюминия.

Интенсивность облучения измерялась в каждом случае интегральным дозиметром и составляла около 15 *r* в минуту.

Подопытные мыши принадлежали к нескольким штаммам, подробная радиобиологическая характеристика которых была дана раньше (Лучник, 1957). Животные были обоих полов и весили в среднем около 20 г. Облучались они γ-лучами при мощности дозы около 10 или около 50 *r* в минуту.

Цистеин вводился разными способами — внутривенно, подкожно или внутрибрюшинно, при pH около 7, для чего продажный гидрохлорид цистеина нейтрализовался эквимолярным количеством едкого натрия. Все растворы приготовлялись непосредственно перед введением.

Семена и проростки гороха перед облучением рентгеновскими или γ-лучами помещались в раствор цистеина соответствующей концентрации. Критерием эффекта служили подавление роста или цитологические ненормальности. В первом случае проростки измерялись и взвешивались, во втором — кончики корешков фиксировались по Карнуа через определенное время после облучения. Исследование производилось на временных препаратах, окрашенных ацетокармином или ацетолакмоидом; при этом определялся процент делящихся клеток, а среди анафаз и телофаз учитывалось число ненормальных митозов (наличие хроматиновых мостиков и фрагментов).

---

[1] В проведении большинства описываемых ниже опытов принимал активное участие Л. С. Царапкин.

РЕЗУЛЬТАТЫ ОПЫТОВ

Опыты на крысах. Целью первых опытов была проверка возможности использования цистеина для защиты живых организмов от вредного действия облучения. В этих опытах была применена абсолютно летальная доза 850 *r*, при которой большинство животных погибают на 3—4-й день (средняя продолжительность жизни 3,49 ± 0,09 дня). Ввиду того что мы не располагали никакими исходными данными, условия опыта сильно варьировались: доза цистеина колебалась в пределах от 50 до 200 мг/кг, его вводили за 5—65 мин. до облучения внутривенно или подкожно.

В связи с высокой дозой облучения погибли все животные, как контрольные, так и подопытные, однако введение цистеина резко меняло продолжительность жизни облученных животных. Так, через четыре дня после облучения в контроле оставалось в живых только 8% крыс, тогда как в опытных группах — 57%. Эта разница статистически вполне реальна ($x^2 = 12{,}66$; $P = 0{,}0004$). В табл. 1 приведены данные средней продолжительности жизни животных в разных вариантах опыта. Детальный анализ полученных данных показал, что подкожное и внутривенное введение дают сходные результаты, что наилучший эффект получается при введении цистеина за 30—40 мин. до облучения и что защитный эффект повышается с увеличением дозировки цистеина.

Таблица 1

Влияние цистеина на продолжительность жизни крыс, облученных летальной дозой рентгеновских лучей (опыты проведены на 63 животных)

Способ введения	Дозировка цистеина (в мг)	Средняя продолжительность жизни (в днях)
Контроль	—	3,49 ± 0,09
Внутривенно	10	4,81 ± 0,58
То же	20	5,20 ± 0,72
То же	40	5,75 ± 1,65
Подкожно	10	4,63 ± 1,20
То же	20	5,49 ± 0,54
То же	40	4,17 ± 0,37

После этого были поставлены опыты с меньшими дозами облучения: 450, 500, 550, 600 и 650 *r*. Применялись две дозировки цистеина: 100 и 900 мг/кг. В первом случае цистеин вводился внутривенно или подкожно, а во втором внутрибрюшинно. Результаты этих опытов изображены на рис. 1. Как видно из рисунка, при абсолютно летальной дозе цистеин повышает продолжительность жизни, а при меньших дозах увеличивает число выживающих крыс. При этом бóльшая дозировка цистеина, как и следовало ожидать, дала больший защитный эффект. В этих опытах наряду со смертностью учитывались также изменения веса и гематологические показатели. На рис. 2 и 3 приведены соответствующие результаты для крыс, облученных дозой 550 *r*. Из этих рисунков видно, что цистеин не влияет ни на начальное падение веса, ни на начальное уменьшение числа эритроцитов и лейкоцитов в периферической крови. Однако он ускоряет возвращение этих показателей к норме.

Опыты на мышах. Как уже было сказано, мыши подвергались только γ-облучению. В этих опытах мы сравнивали защитное действие цистеина

на мышах разных штаммов и изучали зависимость этого эффекта от дозировки цистеина и дозы облучения. Кроме того, на мышах были поставлены опыты с применением некоторых других серусодержащих веществ.

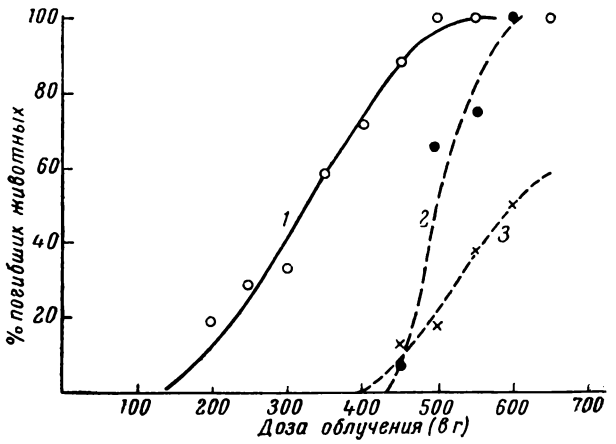


Рис. 1. Зависимость смертности крыс от дозы рентгеновского облучения в контроле (*1*) и при предварительном введении 100 *мг/кг* (*2*) и 900 *мг/кг* (*3*) цистеина

Для сравнения защитного эффекта цистеина на мышах разных штаммов были взяты животные трех «чистых» штаммов — «Х», «М» и «Н» и одного гибридного «КЧ». В опытах с мышами «Н» цистеин испытывался

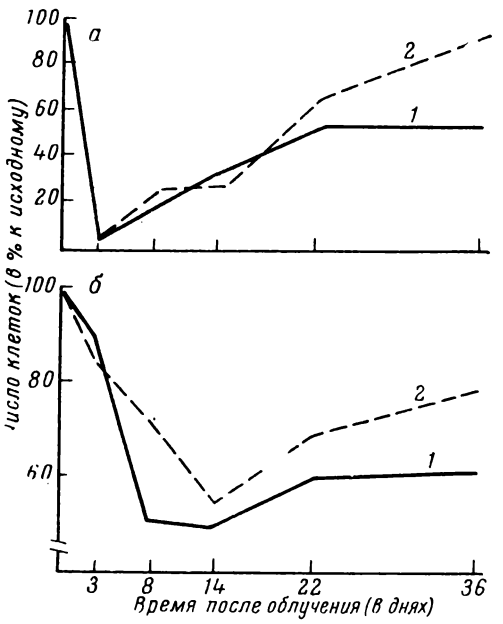


Рис. 2. Число эритроцитов (*а*) и лейкоцитов (*б*) в периферической крови крыс в контроле (*1*) и при введении цистеина (*2*) через разное время после облучения дозой 550 *г* рентгеновских лучей

на самцах и на самках, с остальными мышами — только на самцах. В связи с тем, что мыши этих штаммов имеют разную радиочувствительность (Лучник, 1957), были применены разные физические дозы облу-

чения, с таким расчетом, чтобы они оказали примерно одинаковый биологический эффект. За 5—15 мин. до облучения подопытным животным вводился цистеин из расчета 300 мг/кг. Результаты этого опыта приведены в табл. 2.

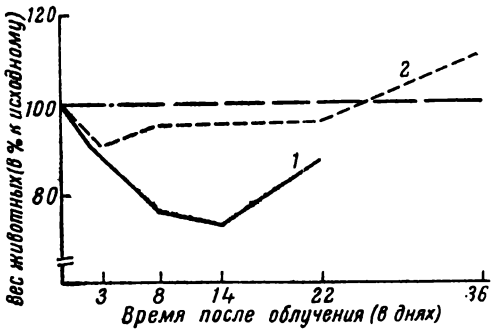


Рис. 3. Вес крыс в контроле (*1*) и при введении цистеина (*2*) через разное время после облучения дозой 550 *r* рентгеновских лучей

Как видно из приведенных данных, во всех случаях введение цистеина перед облучением снизило смертность. Хотя в двух группах из пяти разница была статистически нереальна, вряд ли можно сомневаться в эффек-

Таблица 2

Влияние цистеина, вводимого перед γ-облучением, на смертность мышей разных штаммов

Пол и штамм	Доза облучения, (в *r*)	Вариант опыта	Число мышей	Погибло к 30-му дню		*P*
				число	%	
Самцы «Х»	600	Контроль . .	17	12	70,6	0,008
		Цистеин . . .	17	4	23,5	
Самцы «КЧ«	800	Контроль . .	18	10	55,6	0,253
		Цистеин . . .	18	7	38,9	
Самцы «М»	550	Контроль . .	20	17	85,0	0,020
		Цистеин . . .	20	10	50,0	
Самцы «Н»	700	Контроль . .	24	15	62,5	0,009
		Цистеин . . .	24	6	25,0	
Самки «Н»	700	Контроль . .	24	16	66,7	0,240
		Цистеин . . .	24	12	50,0	

тивности цистеина и для этих мышей. С другой стороны, несомненно, что защитное действие цистеина на мышей разных линий неодинаково. Биологическая доза облучения была во всех опытах одинакова — смертность в контроле варьировала от 36 до 71%. Снижение же смертности под действием цистеина варьировало от 17 до 47%, причем это не кажущаяся разница, связанная с формой кривых эффекта дозы. Если сравнивать не проценты, а пробиты (благодаря чему достигается выпрямление кривых) или относить разность пробитов к наклону кривой эффекта дозы, то разница в эффективности цистеина на разных мышах

сохраняется. Пол также оказывает влияние на эффективность цистеина: в опытах с мышами «Н» эффект на самках и на самцах был неодинаков. Обращает на себя внимание и то обстоятельство, что минимальный эффект цистеин оказал на мышей «КЧ» и на самок «Н», т. е. на наиболее радиорезистентных животных. Возможно, что это совпадение не случайно. Накопленный в нашей лаборатории материал по действию различных противолучевых средств на мышей разных линий оставляет впечатление, что вообще более радиочувствительные животные легче поддаются лечению.

Влияние количества вводимого цистеина на защитный эффект изучалось на мышах «Н». 72 мыши были разбиты на шесть групп, в каждой из которых было по 6 самцов и 6 самок. Перед облучением каждому животному из первых пяти групп вводилось соответственно по 5, 10, 15, 20, и 25 мг цистеина; последняя группа была контрольной. Все животные облучались γ-лучами в дозе 700 *r*. Результаты опытов приведены в табл. 3.

Таблица 3

Влияние разных дозировок цистеина на смертность мышей «Н», облученных дозой 700 *r*

Дозировка цистеина (в *мг*)	Число мышей	Погибло к 30-му дню	
		число	%
Контроль	12	12	100,0
5	12	10	83,3
10	12	11	91,7
15	12	9	75,0
20	12	9	75,0
25	12	8	66,7

Примечание. Облучение производилось γ-лучами при мощности дозы около 50 *r* в 1 мин. Цистеин вводился перед облучением внутрибрюшинно.

Анализ полученных результатов показывает, что пробит смертности зависит от количества вводимого цистеина примерно линейно, причем при данной дозе облучения каждые 100 мг/кг цистеина снижают «эффективную дозу» приблизительно на 20 *r*. Следует, однако, подчеркнуть, что приводимая цифра ориентировочна не только из-за небольшого числа животных, участвовавших в опыте, но и потому, что цистеин оказывает на разных животных неодинаковый защитный эффект.

Для изучения защитного эффекта при разных дозах облучения были взяты мыши двух штаммов — «Х» и «КЧ». В соответствии с различиями в радиочувствительности этих штаммов мыши «Х» облучались дозами 500, 600, 700 и 1000 *r*, а мыши «КЧ» — 500, 600, 700 и 800 *r*. Цистеин вводился непосредственно перед облучением внутрибрюшинно, из расчета 800 мг/кг. Результаты опытов приведены в табл. 4.

Как видно из приведенных данных, наибольшее снижение смертности имеет место при дозах порядка ЛД 50/30; при меньших и больших дозах облучения эффект уменьшается. Это объясняется S-образной формой кривой эффекта дозы. При выпрямлении кривых при помощи преобразования процентов смертности в пробиты оказывается, что процентное снижение пробита смертности прямо пропорционально дозе облучения. Такой результат можно объяснить тем, что при данных условиях цистеин снижает определенный процент лучевого поражения, т. е. как бы уменьшает эффективную дозу облучения.

Таблица 4

Защитный эффект цистеина при разных дозах облучения

Штамм мышей	Доза облучения (в *r*)	Вариант опыта	Число мышей	Погибло к 30-му дню		Разница
				число	%	
«Х»	500	Контроль	6	1	16,7	16,7
		Цистеин	6	0	0	
»	600	Контроль	17	12	70,6	47,1
		Цистеин	17	4	23,5	
»	700	Контроль	15	14	93,3	20,0
		Цистеин	15	11	73,3	
»	1000	Контроль	14	14	100,0	14,3
		Цистеин	14	12	85,7	
«КЧ»	600	Контроль	8	0	0	25,0
		Цистеин	8	2	25,0	
»	700	Контроль	19	4	21,1	21,1
		Цистеин	19	0	0	
»	800	Контроль	18	10	55,6	16,7
		Цистеин	18	7	38,9	
»	900	Контроль	8	8	100,0	0
		Цистеин	8	8	100,0	

Примечание. Облучение производилось γ-лучами при мощности дозы около 10 *r* в 1 мин. Цистеин вводился внутрибрюшинно в количестве 800 мг/кг.

Наряду с цистеином в наших опытах было испытано также несколько других серусодержащих веществ, так как некоторые авторы (Семенов и Прокудина 1956; Patt, Smith, Tyree a. Straube, 1950; Burnett, Stapleton a. Hollaender, 1951) высказывали точку зрения, что защитное действие свойственно многим веществам, содержащим серу. Так как в последнее время уже опубликовано несколько работ, авторы которых подвергали сравнительному изучению большое число аналогов цистеина (Bacq et Herve, 1952; Langendorff, Koch u. Hagen, 1954), мы не хотели дублировать или дополнять эти работы, а предпочли подвергнуть более дифференцированному сравнению небольшое число веществ.

В табл. 5 приведены результаты опытов, в ходе которых мышам-самцам штамма «Н», облученным дозой 700 *r*, вводились перед облучением цистеин, тиомочевина, гипосульфит натрия, гидросульфит натрия, метилтиоурацил или анилид тиогликолевой кислоты. Все вещества вводились внутрибрюшинно в количестве 10 мг на животное, за исключением анилида тиогликолевой кислоты, дозировку которой из-за ее токсичности пришлось снизить до 3 мг. Реальный защитный эффект проявил только цистеин, снизивший смертность на 58%; эффективность остальных веществ статистически нереальна. В литературе, однако, имеются указания на значительный защитный эффект тиомочевины (Семенов, 1956; Limperos, 1952; Mole, 1951 и др.). Для выяснения этого противоречия были поставлены специальные опыты.

Как явствует из ряда работ, в том числе и из данной, многие противолучевые вещества оказывают неодинаковый эффект на животных разных штаммов. Поэтому мы поставили опыты по выяснению действия тиомочевины на смертность облученных мышей разных штаммов. Результаты этих опытов приведены в табл. 6.

Таблица 5

Влияние различных серусодержащих веществ на смертность мышей «Н», облученных дозой 700 *r*

Вводимое вещество	Число мышей	Погибло к 30-му дню		Разница	χ^2	*P*
		число	%			
Контроль	24	18	75,0	—	—	—
Цистеин	24	4	16,7	58,3	18,9	<0,05
Тиомочевина	24	16	66,7	8,3	0,42	>0,05
Гидросульфит	24	14	58,4	16,6	1,49	>0,05
Гипосульфит	24	16	66,7	8,3	0,42	>0,05
Метилтиоурацил	24	14	58,4	16,6	1,49	>0,05
Анилид тиогликолевой кислоты	24	12	50,0	25,0	3,20	>0,05

Примечание. Облучение производилось γ-лучами при мощности дозы около 50 *r* в 1 мин.

Во всех группах введение тиомочевины несколько снизило смертность мышей, однако ни в одной группе эффект не был реален. Даже если объединить все группы, что дает общий материал около сотни животных, то и тогда разница оказывается нереальной (смертность равна соответственно 80,4 и 66,7%; $x^2 = 2{,}47$; $P = 0{,}1$). В связи с тем, что большинство

Таблица 6

Влияние тиомочевины на смертность облученных мышей разных штаммов

Пол и штамм мышей	Доза облучения (в *r*)	Вариант опыта	Число мышей	Погибли к 30-му дню		Разница	*P*
				число	%		
Самцы «Х»	600	Контроль	15	11	73,7	13,7	0,34
		Тиомочевина	15	9	60,0		
Самцы «К»	600	Контроль	12	12	100,0	8,3	0,50
		Тиомочевина	12	11	91,7		
Самцы «М»	500	Контроль	12	9	75,0	25,0	0,20
		Тиомочевина	12	6	50,0		
Самцы «Н»	700	Контроль	24	18	75,0	8,3	0,50
		Тиомочевина	24	16	66,7		

Примечание. Облучение производилось γ-лучами при мощности дозы около 50 *r* в 1 мин. Тиомочевина вводилась внутрибрюшинно перед облучением в количестве 10 мг на животное.

авторов, сообщающих о защитном эффекте тиомочевины, применяли большие дозировки, мы поставили на мышах «М», давших с дозировкой 10 мг наилучшие результаты, опыты по введению больших количеств тиомочевины. Результаты их приведены в табл. 7.

Оказалось, что при увеличении дозировки до 40 мг тиомочевина дает тот же эффект, что и цистеин в количестве 10 мг. Следует отметить, что молекулярный вес тиомочевины CH_4N_2S (76) меньше такового цистеина

Таблица 7

Влияние разных дозировок тиомочевины на смертность мышей «М», облученных дозой 500 *r*

Дозировка (в мг)	Вариант опыта	Число мышей	Погибло к 30-му дню		Разница	*P*
			число	%		
10	Контроль	12	9	75,0	25,0	0,200
	Тиомочевина . .	12	6	50,0		
20	Контроль	12	11	91,7	8,4	0,500
	Тиомочевина . .	12	10	83,3		
40	Контроль	12	10	83,3	58,3	0,006
	Тиомочевина . .	12	3	25,0		

Примечание. Облучение производилось γ-лучами при мощности дозы около 50 *r* в 1 мин. Тиомочевина вводилась внутрибрюшинно непосредственно перед облучением.

$C_3H_7O_2NS$ (121), так что по молярности дозировка тиомочевины превышала дозировку цистеина более чем в шесть раз. Результаты опытов позволяют сделать заключение, что некоторые другие серусодержащие вещества также обладают защитными свойствами, однако большинство их при тех же дозировках оказывает более слабый эффект, чем цистеин.

В рассмотренных только что опытах, проведенных с дозой облучения порядка ЛД 50/30, смерть животных могла происходить от разных конечных причин; для дифференциального же анализа смертности эксперименты в таком объеме не пригодны. Если же облучать животных более высокими дозами, то материал получается более однородным, так как все мыши погибают за счет патофизиологических процессов с коротким латентным периодом. Анализируя материал с точки зрения теории пиков (Лучник, 1957), можно сказать, что, например, при дозе облучения 1000 *r* большинство животных погибает в первый пик, значительно меньшее число — во второй и третий, а более поздние пики смертности вообще не проявляются. В табл. 8 приведены результаты опытов по облучению мышей штамма «Н» дозой 1000 *r* с предварительным введением цистеина, тиомочевиины, гидросульфита, гипосульфита или анилида тиогликолевой кислоты.

Таблица 8

Влияние различных серусодержащих веществ на смертность мышей штамма «Н», облученных дозой 1000 *r*

Вводимое вещество	Дозировка (в мг)	Число животных	Смертность через						Средняя продолжительность жизни	
			5,5 дня		7,5 дня		10 дней			
			%	*P*	%	*P*	%	*P*	в днях	*P*
Контроль . . .	—	300	84,7	—	98,4	—	100	—	4,05 ± 0,08	—
Цистеин	15	12	58,3	<0,05	83,3	<0,05	91,7	<0,05	5,50 ± 0,69	<0,05
Тиомочевина . .	20	12	66,7	>0,05	75,0	<0,01	100,0	>0,05	5,10 ± 0,72	>0,05
Гидросульфит .	10	12	75,0	>0,05	75,0	<0,01	100,0	>0,05	5,25 ± 0,61	<0,05
Гипосульфит . . .	20	12	75,0	>0,05	83,3	<0,05	100,0	>0,05	4,50 ± 0,58	>0,05
Анилид тиогликолевой кислоты	3	12	75,0	>0,05	83,3	<0,05	100,0	>0,05	4,33 ± 0,64	>0,05

Примечание. Облучение производилось γ-лучами при мощности дозы около 50 *r* в 1 мин. Все вещества вводились внутрибрюшинно перед облучением.

Ввиду очень высокой дозы облучения во всех группах смертность достигла 100% уже к 11-му дню, а средняя продолжительность жизни мышей варьировала от 4,05 в контроле до 5,50 дня в опыте с цистеином. Если судить по средней продолжительности жизни, то реальный эффект дали только цистеин и гидросульфит. Однако дифференциальный анализ приводит к иному выводу. Оказывается, что все испытанные вещества оказали положительное действие, но цистеин снизил все три пика, а все остальные вещества избирательно подействовали только на второй.

Эти результаты показывают, что цистеин превосходит по защитному действию другие серусодержащие вещества, потому что он обладает более широким «спектром противолучевого действия».

Заканчивая описание опытов на животных, необходимо упомянуть и о том, что на крысах и нескольких штаммах мышей был поставлен ряд опытов по введению цистеина после облучения. В этих опытах варьировались дозировка цистеина, время и число инъекций, но везде были получены отрицательные результаты. Точно такой же результат дал опыт по изучению влияния цистеина на токсичность радиоцерия; в этом опыте введение цистеина даже несколько повысило смертность животных.

Опыты на горохе. Наряду с большим числом работ по действию цистеина на облученных млекопитающих защитный эффект его на растениях изучен очень слабо. Поэтому на горохе мы поставили наиболее детальные опыты, которые в связи со сравнительной примитивностью подопытного объекта легче поддаются истолкованию.

Прежде чем приступить к основным опытам, мы решили проверить, как действует цистеин на исследуемые нами реакции, независимо от облучения. Это было необходимо, так как в литературе имелись очень противоречивые данные по указанному вопросу (Binet et Weller, 1937). Опыты ставились с солянокислым цистеином (в ряде случаев нейтрализованным NaOH) и цистином.

При замачивании семян в растворах цистеина разных концентраций (от 10^{-5} до 10^{-3} молей на литр) в течение 24 час. их прорастание и развитие на ранних стадиях идет нормально. Концентрация 10^{-2} молей на литр задерживает прорастание и тормозит рост, а при концентрации цистеина 10^{-1} молей на литр семена вообще не прорастают. При этом как солянокислый, так и нейтральный цистеин дают одинаковые результаты. В противоположность этому цистин в концентрациях от 10^{-5} до 10^{-2} молей на литр ускоряет рост и деление клеток; концентрация 10^{-1} молей на литр оказывается летальной. Так как цистин представляет собой окисленную форму цистеина и оба вещества, имея почти одинаковый химический состав, отличаются только своими окислительно-восстановительными свойствами, столь заметная разница в их действии указывает на роль окислительных процессов при делении клеток.

На рис. 4 изображены длина корней и митотическая активность в первичной меристеме корней через трое суток после замачивания семян в растворах цистеина и цистина разных концентраций.

При цитологическом исследовании не было обнаружено никаких сколько-нибудь существенных отклонений от нормы; только при замачивании в растворах цистина высокой концентрации можно было отметить более слабую окрашиваемость ядра основными красками.

Затем изучалось действие цистеина на проростки, для чего они помещались на разное время в раствор цистеина концентрацией 0,1 моля на литр и фиксировались сразу же после окончания воздействия. Результаты этих опытов представлены на рис. 5. Из этих данных видно, что цистеин сильно подавляет митотическую активность, а при воздействии в течение 10—12 час. полностью ее приостанавливает. При этом встречается значительное число ненормальных митозов; наиболее часты мостики и агглюти-

нация хроматина. Так как фрагменты почти отсутствуют, то мостикам следует приписать неспецифическое «физиологическое» происхождение. При кратковременном воздействии (до 2 час.) ненормальные митозы почти не наблюдаются. Затем число их начинает повышаться, достигая максимума при воздействии в течение 5 час. С этого времени начинают попадаться отдельные погибшие пикнотические клетки. Через 12 час. все клетки погибают. Картина цитологического поражения при воздействии

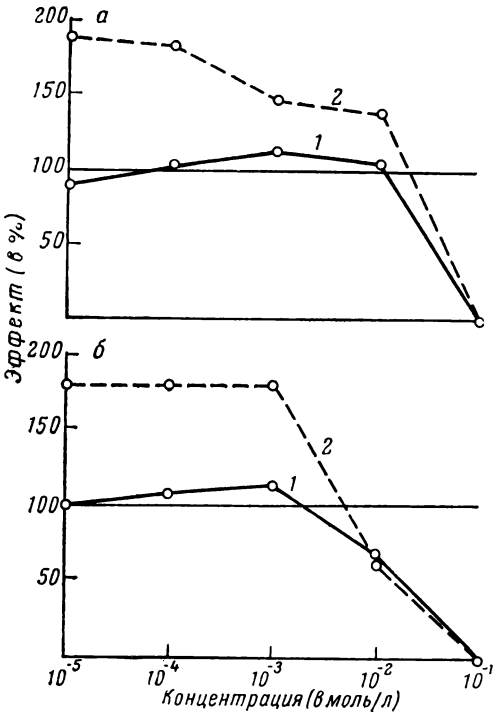


Рис. 4. Влияние разных концентраций цистеина (*1*) и цистина (*2*) на рост гороха (*а*) и митотическую активность его клеток (*б*). Цифры даны в процентах водного контроля

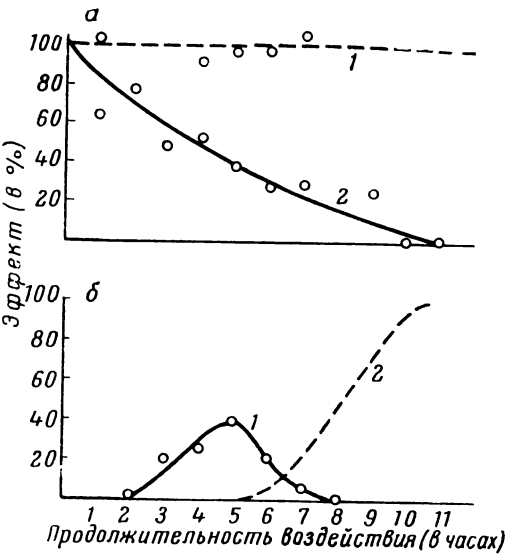


Рис. 5. Влияние цистеина (0,1 *моль/л*) на цитологические эффекты после воздействия разной продолжительности

а — митотическая активность в контроле (*1*) и при воздействии цистеина (*2*); *б* — ненормальные клетки: *1* — анафазы с хроматиновыми мостиками; *2* — пикнотические ядра

цистеина не отличается от той, которая наблюдается при действии высоких концентраций многих химических веществ. При непродолжительном воздействии (до 2 час.) цистеин не оказывает видимого эффекта даже при концентрации 0,1 моля на литр. На рис. 6 показано, что двухчасовое замачивание проростков в растворах цистеина не стимулирует и не подавляет их роста.

Приступая к опытам по совместному действию облучения и цистеина на горох, мы не знали, какие дозы облучения и концентрации цистеина окажутся наиболее подходящими. Поэтому было поставлено несколько предварительных опытов. На рис. 7 показана зависимость веса растений гороха 10-дневного возраста от дозы γ-облучения проростков. Можно видеть, что дозы до 300 *r* оказывают стимулирующее действие на рост, а более высокие подавляют его. Наиболее удобной для экспериментирования представляется область между 400 и 700 *r*, так как на этом участке зависимость эффекта от дозы близка к линейной, что значительно облегчает обработку данных. В первых опытах по совместному воздействию на проростки гороха облучения и цистеина критерием эффекта служил вес растений; при этом варьировались как доза облучения, так и концентрация

цистеина. Результаты этих опытов приведены в табл. 9. Приближенный анализ полученных цифр показывает, что защитный эффект возрастает пропорционально логарифму концентрации цистеина и что наибольшее влияние цистеин оказывает при облучении в дозах 500—600 *r*.

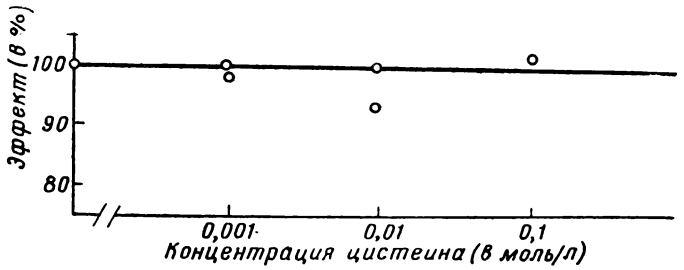


Рис. 6. Влияние разных концентраций цистеина на рост гороха. Цифры даны в процентах водного контроля

Следующая серия опытов была поставлена с одинаковой дозой облучения (500 *r*), но при различных концентрациях цистеина. В этом случае наряду с ростом и весом растений учитывались также цитологические показатели. Цитологические исследования производились через 2, 5, 12 и

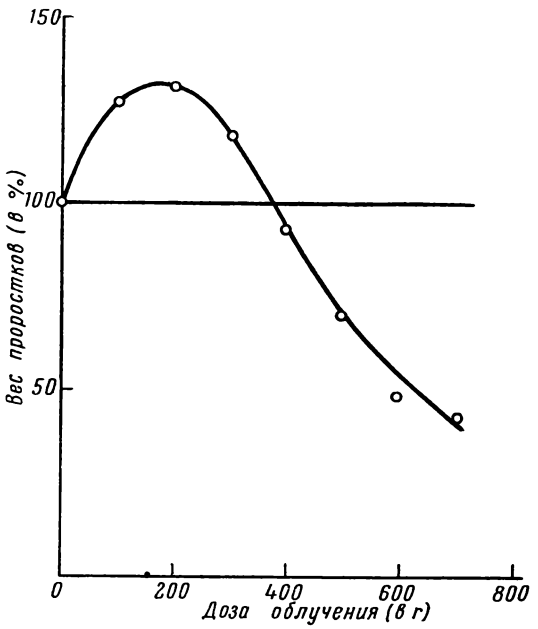


Рис. 7. Влияние разных доз гамма-облучения на рост гороха, определяемый по весу проростков. Цифры даны в процентах необлученного контроля

24 часа после облучения и дали сходные результаты. На рис. 8 изображены результаты цитологического анализа через 24 часа. Из приведенных данных видно, что эффект и здесь повышается с увеличением концентрации и связан с ней приблизительно логарифмической зависимостью. На рис. 9 сопоставлена зависимость между цитологическими и общими эффектами при совместном действии разных концентраций цистеина и γ-лучей (570 *r*). Кривые колебания процента ненормальных анафаз, а также динамики веса и роста растений идут очень сходно. Это показывает,

во-первых, что подавление развития проростков после облучения происходит в значительной мере за счет клеточных поражений и, во-вторых, что цистеин снижает общий эффект, уменьшая число цитологических изменений.

Таблица 9

Совместное действие γ-лучей и цистеина на вес 10-дневных растений гороха (в процентах от веса необлученного контроля)

Концентрация цистеина (в *моль/л*)	Доза облучения (в *r*)			
	400	500	600	700
0	78	68	62	40
0,001	92	67	66	60
0,01	91	76	59	79
0,1	91	90	75	71

В дальнейшем, чтобы выяснить, как зависит защитный эффект цистеина от времени, в течение которого он действует на проростки, последние подвергались действию 0,1 молярного раствора цистеина от 1 до 6 час. и сразу же после этого подвергались γ-облучению в дозе 570 *r*. Фиксировался материал через 24 часа после облучения. На рис. 10 даны результаты

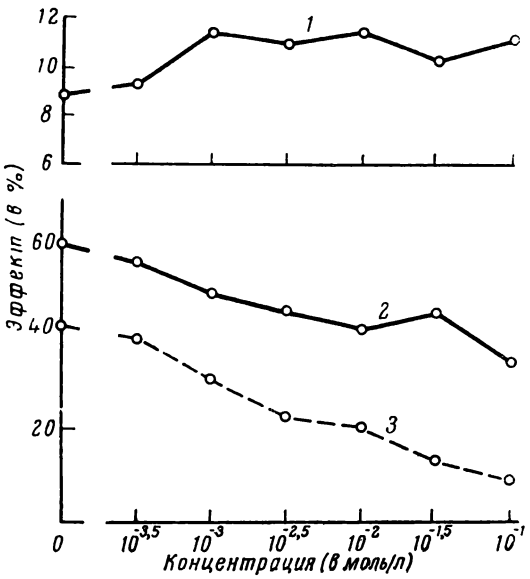


Рис. 8. Влияние разных концентраций цистеина на митотическую активность (*1*) и процент анафаз с мостиками (*2*) и фрагментами (*3*) в корневой меристеме гороха, облученного дозой 570 *r* гамма-лучей. Фиксация через 24 часа после облучения

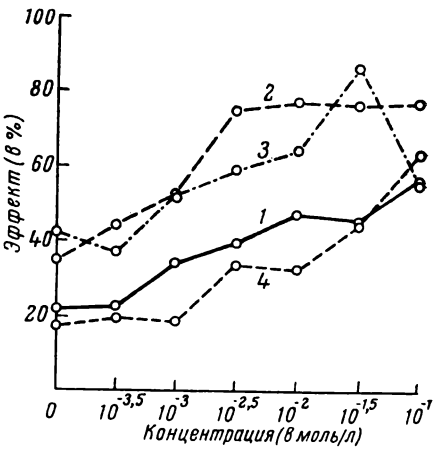


Рис. 9. Корреляция между цитологическими и общими эффектами при совместном действии разных концентраций цистеина и γ-лучей (570 *r*)

1 — процент нормальных анафаз через 24 часа после облучения; *2* — вес растений; *3* — длина корней; *4* — длина стеблей через 10 суток после облучения. Цифры даны в процентах необлученного водного контроля

этих опытов, свидетельствующие о том, что между результатами замачивания в течение 2—6 часов нет никакой существенной разницы; однако часовое замачивание в большинстве случаев дает меньший защитный эффект.

Специальные опыты были поставлены для выяснения вопроса о том, какое значение имеет присутствие цистеина в ткани во время облучения. Вначале был поставлен комплексный опыт, в котором проростки помещались в децимолярный раствор цистеина или в воду и сразу же подвергались облучению рентгеновскими лучами, которое продолжалось всего 10 мин. За это время в проростках не могло произойти под действием цистеина никаких существенных изменений. После этого проростки помещались на несколько часов в сантимолярный раствор цистеина или в воду. В сжатой форме результаты этих опытов представлены в табл. 10.

Из таблицы видно, что даже кратковременное воздействие цистеина во время облучения дает заметный защитный эффект, а после облучения нисколько не влияет на число патологических изменений, вызванных лучами. В последующих опытах, предпринятых с той же целью, проростки находились в сантимолярном растворе цистеина в течение 4 час., затем часть из них тщательно промывалась в проточной воде (в течение 5 мин.), после чего все проростки одновременно облучались рентгеновскими лучами. Результаты представлены в табл. 11.

Полученные цифры показывают, что промывка проростков перед облучением заметно ослабляет защитный эффект. Это говорит за то, что существенно не действие цистеина на клетки перед облучением, а его присутствие в них во время облучения.

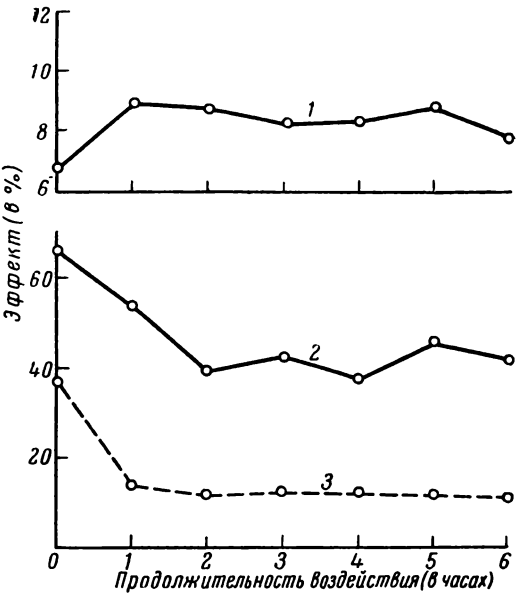


Рис. 10. Влияние продолжительности предварительного воздействия цистеина (0,1 *моль/л*) на эффект γ-облучения (570 *r*)

1 — митотическая активность; *2* — процент анафаз с мостиками; *3* — процент анафаз с фрагментами. Фиксация через 24 часа после облучения

Таблица 10

Влияние цистеина во время и после облучения на цитологические изменения

Вариант опыта	Число ана- и телофаз		Процент ненормальных клеток
	исследованных	ненормальных	
Облучение в воде	560	215	38,4 ± 2,18
Облучение в цистеине	556	160	28,8 ± 1,92
Вода после облучения	556	184	33,2 ± 2,00
Цистеин после облучения	560	191	34,2 ± 2,01

Примечание. Проростки облучались дозой 550 *r* рентгеновских лучей при 170 kV, 15 mA, 55 *r* в 1 мин.

Таблица 11

Влияние промывки проростков на защитный эффект цистеина

Вариант опыта	Число ана- и телофаз		Процент ненормальных клеток
	исследованных	ненормальных	
Перед облучением промыты	283	76	$26{,}9 \pm 2{,}64$
Перед облучением не промыты	300	58	$19{,}3 \pm 2{,}28$

Примечание. Проростки облучались дозой 260 *r* рентгеновских лучей при 80 kV, 3 mA, 28 *r* в 1 мин.

Заканчивая рассмотрение опытов на горохе, следует обратить внимание на соотношение разных типов нарушений митоза в контроле и при воздействии цистеина. В табл. 12 представлены соответствующие данные, причем для получения более достоверных цифр материал по более слабым и более сильным концентрациям цистеина суммирован.

Таблица 12

Характер структурных отклонений в клетках гороха, облученных дозой 570 *r*, в контроле и при воздействии цистеина

Показатели	Водный контроль		Слабые концентрации цистеина		Сильные концентрации цистеина	
	число	%	число	%	число	%
Всего исследовано анафаз . . .	405	—	449	—	500	—
Из них:						
ненормальных анафаз . .	339	83,7	306	68,1	261	52,2
анафаз с мостиками . . .	259	64,0	231	51,5	218	43,6
анафаз с фрагментами . .	167	41,2	144	32,1	79	15,8
Число мостиков на 1 клетку с мостиками		1,6		1,7		1,6
Число фрагментов на 1 клетку с фрагментами		1,9		2,1		1,9

Примечание. Для анализа взят опыт, результаты которого изображены на рис.

Из приведенных данных видно, что цистеин в большей мере уменьшает число фрагментов, чем число мостиков. Данное обстоятельство может говорить в пользу того, что действие цистеина объясняется в значительной мере повышением вероятности воссоединения разрывов. На этом основании предстает в несколько ином свете механизм образования хромосомных перестроек. Если цистеин по-разному влияет на образование разрывов и воссоединение хромосом, значит эти процессы друг с другом не связаны или связаны в малой степени. Мы предполагаем, что первичные разрывы возникают в результате прямых ионизаций, а их дальнейшая судьба определяется более общими внутриклеточными изменениями, связанными с действием продуктов радиолиза воды.

Обращает на себя внимание и тот факт, что среднее число мостиков или фрагментов на измененную клетку не уменьшается при действии цистеина, а уменьшается только число пораженных клеток. Этот факт также говорит в пользу предположения о том, что процесс воссоединения определяется не узко локальными условиями, а общим состоянием клетки.

ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ

Описанные выше опыты показывают, что цистеин, примененный перед облучением, оказывает сходное противолучевое действие на ряд биологических объектов и процессов. Он повышает выживаемость мышей и крыс, улучшает у них картину периферической крови, уменьшает подавление роста гороха и число ненормальных митозов в его клетках. Следовательно, действие цистеина не ограничивается определенными биологическими объектами или процессами. Подобный характер эффекта цистеина указывает на то, что данное вещество действует на какие-то начальные звенья радиобиологической реакции, общие для многих объектов. Наши опыты, показывающие необходимость присутствия цистеина в ткани во время облучения, говорят в пользу того, что цистеин действует путем уменьшения выхода продуктов радиолиза воды. В том же смысле должны быть истолкованы данные о полной неэффективности применения цистеина после облучения, особенно в связи с тем весьма вероятным фактом, что цистеин оказывает влияние не на число первичных разрывов, а на их дальнейшую судьбу. В пользу этого предположения говорят также некоторые литературные данные, например то, что при облучении в анаэробных условиях сульфгидрильные соединения не дают дополнительной защиты (Wolff, 1954).

Вместе с тем некоторые факты говорят против упрощенного представления, согласно которому цистеин лишь уменьшает «эффективную дозу», Наши опыты показывают, что мышей разных штаммов и разного пола цистеин защищает в разной степени. Точно так же из опытов на крысах видно, что цистеин не уменьшает начального падения веса и начального уменьшения числа форменных элеметов в периферической крови, а только ускоряет их возвращение к норме. Однако в опытах на горохе мы наблюдали уменьшение поражения уже через 2,5 часа после облучения. Поэтому следует думать, что цистеин по-разному влияет на разные эффекты облучения и что его влияние осуществляется в какой-то мере через взаимодействие с физиологическими процессами.

Сравнение защитного эффекта цистеина и других веществ, содержащих серу, показывает, что цистеин превосходит по силе защитного действия все остальные испытанные в этой работе вещества. Кроме того, анализ действия цистеина на пики смертности говорит за то, что он снижает большее число пиков, иными словами, влияет на большее число процессов, ведущих к гибели животных. Нужно думать, что именно поэтому цистеин до сих пор остается одним из наиболее мощных противолучевых средств.

Резюмируя, можно сказать, что наши опыты подтверждают первоначальную точку зрения о том, что цистеин осуществляет свой защитный эффект, влияя на ход или результат первичных радиационно-химических реакций. Однако его эффективность в значительной мере зависит и от каких-то чисто биологических процессов, природа которых в настоящее время не ясна.

ВЫВОДЫ

1. Описываются опыты на крысах, мышах и горохе по изучению защитного действия цистеина при облучении.

2. Введение цистеина перед облучением в не слишком высоких дозах повышает число выживающих мышей и крыс, а при более высоких — увеличивает среднюю продолжительность жизни. Введение цистеина после облучения не дает никакого эффекта.

3. Цистеин не влияет на начальное падение веса и числа форменных элементов в периферической крови у крыс, но ускоряет возвращение этих показателей к норме.

4. На мышей разных штаммов, а также на самцов и самок одного штамма цистеин влияет в разной степени.

5. Защитный эффект цистеина возрастает с увеличением вводимого количества вплоть до субтоксических дозировок.

6. Другие содержащие серу вещества в опытах на мышах проявили значительно менее выраженные защитные свойства, чем цистеин.

7. В опытах на горохе цистеин, не оказывающий без облучения никакого видимого влияния, при применении перед облучением снижает подавление роста и число ненормальных митозов, причем оба эффекта коррелируют друг с другом.

8. На горохе защитное действие цистеина приблизительно пропорционально логарифму его концентрации. Максимальный защитный эффект достигается при двухчасовом вымачивании в растворе цистеина.

9. Для осуществления защитного эффекта необходимо присутствие цистеина в ткани во время облучения.

10. Некоторые данные говорят в пользу того, что цистеин преимущественно влияет не на число первичных разрывов, а на их дальнейшую судьбу.

ЛИТЕРАТУРА

Куликова В. Г., Лучник Н. В., Тимофеев-Ресовский Н. В. и Тимофеева-Ресовская Е. А. Лучевые поражения и воздействие на них. III. Влияние введения чужеродных сывороток, некоторых гормонов и предварительного облучения на эффект последующего облучения мышей. Тр. Ин-та биол. УФАН СССР, вып. 9. Свердловск, 1957.

Лучник Н. В. Лучевые поражения и воздействие на них. II. Зависимость смертности облученных мышей и крыс от дозы облучения, пола, веса и штамма животных и распределение этой смертности во времени. Тр. Ин-та биол. УФАН СССР, вып. 9. Свердловск, 1957.

Лучник Н. В. Лучевые поражения и воздействие на них. VI. Действие дрожжевых экстрактов на смертность облученных мышей и на проростки гороха. Статья в настоящем сборнике.

Семенов Л. Ф. и Прокудина Е. А. О применении некоторых серусодержащих соединений в профилактике лучевой болезни. «Медицинская радиология», 1956, т. 1.

Тимофеев-Ресовский Н. В. и Лучник Н. В. Лучевые поражения и воздействие на них. I. О классификации возможных путей воздействия на общий эффект облучения. Тр. Ин-та биол. Уральского филиала АН СССР, вып. 9. Свердловск. 1957.

Bacq Z. M. et Herve A. Protection chimique contre le rayonnement X. Bull. Acad. Roy. Med. Belg., 1952, vol. 17, p. 13.

Barron E. S. G. a. Dickman S. Studies of the mechanism of action of ionizing radiation. J. Gen. Physiol., 1949, vol. 32, p. 595.

Binet L. et Weller G. Le glutathion. Paris, 1937.

Burnett W. T., Stapleton G. E. a. Hollaender A. Protective action of some sulfur containing and sulfur free compounds against X-ray damage in bacteria. Fed. Proc., 1951, vol. 10, p. 22.

Jacobson L. O. A humoral factor concerned in recovery from irradiation injury. Canc. Res., 1952, vol. 12, p. 315.

Langendorff H., Koch R. u. Hagen U. Untersuchungen über einen biologischen Strahlenschutz. VIII. Mitteilung. Strahlentherapie, 1954, Bd. 95, S. 238.

Limperos G. Alteration of the mortality of roentgen irradiated mice by chemical means. Am. J. Roentgenol., 1952, vol. 67, p. 810.

Miller C. P., Hammond C. W. a. Tompkins M. Reduction of mortality from X-radiation by treatment with antibiotics. Science, 1950, vol. III, p. 719.

Mole R. H. Protection from whole body-irradiation by chemical means. J. Chim. Phys., 1951, vol. 48, p. 258.

Patt H. M., Shith D. E., Tyree E. B. a. Straube R. L. Further studies on modification of sensitivity to X-rays by cysteine. Proc. Soc. Exptl. Biol. a. Med., 1950, vol. 73, p. 18.

Wolff. S. Some aspects of the chemical protection against radiation damage to Vicia faba chromosomes. Genetics, 1954, vol. 39 p. 356.

АКАДЕМИЯ НАУК СССР
УРАЛЬСКИЙ ФИЛИАЛ

Вып. 12 ТРУДЫ ИНСТИТУТА БИОЛОГИИ 1960

Н. В. ЛУЧНИК

ЛУЧЕВЫЕ ПОРАЖЕНИЯ И ВОЗДЕЙСТВИЕ НА НИХ

VI. ДЕЙСТВИЕ ДРОЖЖЕВЫХ ЭКСТРАКТОВ НА СМЕРТНОСТЬ ОБЛУЧЕННЫХ МЫШЕЙ И НА ПРОРОСТКИ ГОРОХА

ВВЕДЕНИЕ

В последние годы усилия многих радиобиологов направлены в значительной своей части на изыскание средств, предотвращающих в той или иной степени повреждения, вызываемые в живых организмах ионизирующими лучами. В результате в настоящее время открыто довольно большое число веществ, снижающих вредное действие радиации; этому вопросу посвящен ряд обзоров, правда страдающих значительной неполнотой (Эльпинер, 1952; Побединский, 1954; Bacq, Herve, 1952; Patt, 1953 и др.). Однако только очень немногие из большого количества известных противолучевых средств оказываются эффективными, если их применять после облучения. Между тем такие «терапевтические» средства представляют особый интерес с теоретической, а тем более с практической точки зрения. Из подобных средств можно назвать в настоящее время только антибиотики (Miller, Hammond, Tompkins, 1950), препараты селезенки (Jacobson, 1952) и костного мозга (Lorenz, Congdon, Uphoff, 1952). Действие других средств, предлагавшихся в качестве терапевтических, оказывается настолько непостоянным, что их в этот список включить нельзя.

Опыты с противолучевыми средствами ведутся нами в течение нескольких лет в двух направлениях. Во-первых, мы пытаемся проверить в сравнимых стандартных условиях действие ряда средств, главным образом уже известных (Куликова, Лучник, Тимофеев-Ресовский и Тимофеева-Ресовская, 1957; Лучник, 1957). Во-вторых, исходя из соображений о механизме действия лучей на живые объекты, ведем поиски новых противолучевых средств [1]. Опыты, описываемые в данной статье, принадлежат к последнему направлению. Упомянув кратко о некоторых из наших экспериментов, которые привели к мысли использовать дрожжевые экстракты в качестве терапевтического противолучевого средства, мы приведем результаты, касающиеся действия дрожжевых экстрактов на облученные животные и растительные организмы. После этого будут изложены данные об

[1] Н. В. Лучник. Лучевые поражения и воздействие на них. IV. Влияние различных веществ, вводимых мышам, на эффект облучения. Статья в настоящем сборнике.

условиях, влияющих на эффективность экстрактов и раскрывающих химическую природу действующего начала. Опытам с нуклеиновой кислотой, которая, как выяснилось, является носителем противолучевых свойств дрожжевых экстрактов, будет посвящена отдельная работа.

Поскольку рассматриваемому вопросу посвящены опыты, ведущиеся с 1948 г., невозможно все данные в подробном виде привести в одной статье. Поэтому основные или наиболее типичные результаты опытов приводятся там, где это возможно, и в наиболее сжатой форме.

МАТЕРИАЛ И МЕТОДИКА

В описываемых опытах использовалась разнообразная и нередко довольно специальная методика. Поэтому здесь будут описаны только наиболее общие приемы, что же касается более частных методов, то они будут даны при описании соответствующих опытов.

Подопытным материалом служили мыши и проростки гороха. Мыши были четырех разных штаммов, условно обозначаемых «М», «Х», «К» и «Н». Подробная характеристика их была дана раньше (Лучник, 1957). Основным критерием служила «острая» смертность животных (в течение 20—30 дней после облучения). Учет смертности производился два раза в сутки. В качестве растительного объекта был взят горох сорта «Капитал». Для опытов семена замачивались 24 часа в воде и затем 48 час. проращивались на влажном песке. Растения помещались в больших плоскодонных пробирках, по 10 в каждой и росли в темноте при температуре 20—22° С. Для цитологического анализа материал фиксировался по Карнуа или по Фармеру. Окраска производилась уксуснокислым кармином, уксуснокислым лакмоидом или фуксинсернистой кислотой по Фейльгену.

Облучение производилось γ-лучами Co^{60} при мощности дозы 10 и 50 *r* в 1 мин. Подробности, касающиеся методики облучения и дозиметрии, были описаны нами раньше (Лучник, 1957).

Для изготовления экстрактов дрожжи суспензировались в пятикратном объеме воды, нагревались до 95° С и находились при этой температуре 15 мин. Затем суспензия повторно центрифугировалась и фильтровалась до получения прозрачной, слегка опалесцирующей жидкости янтарного цвета, обладавшей зеленоватой флюоресценцией. Экстракты вволились мышам внутрибрюшинно в течение 30 мин. после окончания облучения. Иногда производились повторные инъекции. Облученные растения гороха помещались в растворы дрожжевых экстрактов разных концентраций и росли в них до конца опыта [1].

РЕЗУЛЬТАТЫ ОПЫТОВ

Мы начнем с краткого изложения некоторых из полученных экспериментальных данных, приведших нас к мысли использовать нуклеиновые кислоты и дрожжевые экстракты для борьбы с лучевым поражением. Затем опишем первые опыты, показавшие перспективность данного направления работ. Более специальные опыты будут разделены на четыре раздела в соответствии с четырьмя основными вопросами, которые необходимо было разрешить после установления факта терапевтического действия дрожжевых экстрактов: нахождение оптимальной дозировки экстракта, разработка способа получения стандартного препарата, выяснение условий, влияющих на эффективность экстрактов, и раскрытие химической природы действующего агента.

---

[1] В проведении опытов принимал участие Л. С. Царапкин. Определения фосфора сделаны Е. Л. Певзнером.

1. Экспериментальные предпосылки

Изучая биологическое действие излучений, мы часто сталкивались с тем фактом, что общий эффект облучения обычно тесно коррелирует с цитологическими поражениями. При попытках объяснения цитологических эффектов мы пришли к выводу, что одним из основных процессов, ведущих в конечном счете к цитологическим ненормальностям, является изменение обмена нуклеопротеидов [1].

Связь между цитологическим поражением и общим эффектом. Соответствующие опыты ставились на горохе и на дрозофиле. При этом,

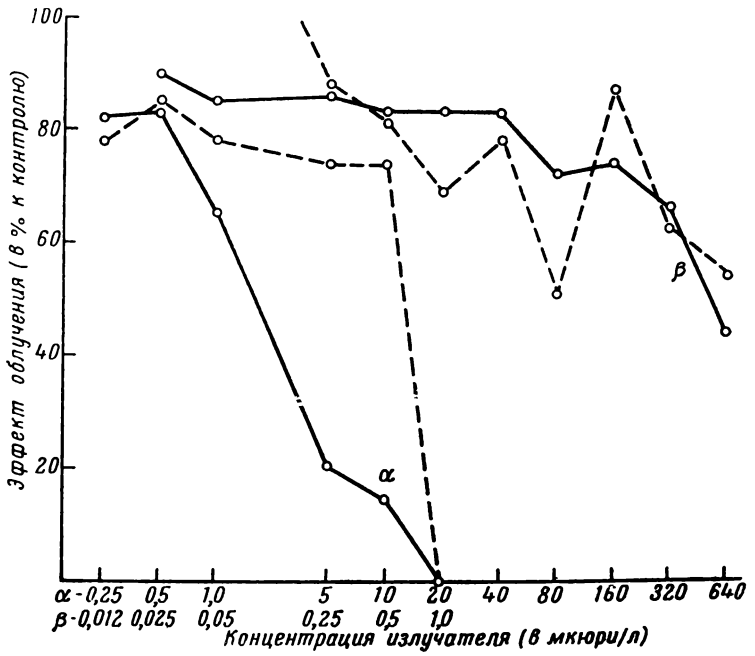


Рис. 1. Корреляция между процентом нормальных клеток в молодых проростках (сплошные линии) и весом корней 9—11-недельных растений гороха (штриховые линии) после замачивания семян в растворах α- и β-излучателей разной концентрации

с одной стороны, исследовались количественно цитологические ненормальности, а с другой, рост растений или эмбриональная смертность насекомых.

В опытах на горохе прежде всего было установлено, что для заметного подавления роста и для вызывания значительного процента цитологических ненормальностей необходимы одни и те же дозы облучения. В различных опытах варьировались продолжительность облучения (мощность дозы), степень набухания семян, жесткость излучения и др., и во всех случаях изменение цитологических и общих эффектов происходило параллельно.

Раньше (Лучник, 1956а) мы приводили данные [2], касающиеся корре-

[1] Н. А. Порядкова, Н. В. Тимофеев-Ресовский, Н. В. Лучник. Проблема радиостимуляции растений. VI. Опыты по облучению семян гороха и пшеницы рентгеновскими и γ-лучами на разных стадиях замачивания и прорастания (см. настоящий сборник).

[2] Н. В. Лучник. Проблема радиостимуляции растений. V. Цитологический анализ явления радиостимуляции (см. настоящий сборник).

ляции между цитологическим поражением и ростом растений на ранних стадиях. Эта связь хотя и ослабляется со временем, но сохраняется в течение всего периода развития растений. На рис. 1 изображены результаты опытов по замачиванию семян гороха в растворах излучателей разной концентрации (в мкюри/л). На этом рисунке приведены для разных доз α- и β-излучателей процент нормальных митозов вскоре после замачивания и вес корней 9—11-недельных растений. Как видно из рисунка, зависимость обоих эффектов от концентрации и типа излучателей оказывается сходной, так что можно говорить об определенной связи между этими эффектами.

В табл. 1 приведены результаты опытов по внешнему облучению семян гороха на разных стадиях набухания. Как явствует из приведенных цифр, и здесь обнаруживается определенная корреляция между первичным цитологическим повреждением и конечным урожаем семян.

Таблица 1

Ненормальности митоза и урожай гороха после облучения семян на разных стадиях 24-часового замачивания дозой 5000 *r* разной мощности

Продолжительность облучения (в часах)	Стадия замачивания	Число исследованных анафаз	Число ненормальных анафаз	Процент нормальных анафаз	Вес зерна на 1 растение	
					в г	в % контроля
24	—	700	207	71,4 ± 1,72	2,08	79
6	Начало	743	153	79,4 ± 1,48	2,46	97
6	Конец	800	216	73,0 ± 1,57	3,26	86
0,5	Начало	636	85	86,6 ± 1,35	2,51	95
0,5	Конец	400	91	77,3 ± 2,10	3,01	76
Контроль	—	—	—	—	2,64	100

К аналогичным выводам приводят опыты и на животных. На рис. 2 дана установленная в наших опытах зависимость от дозы облучения числа жизнеспособных хромосомных перестроек, обнаруживаемых цитологически в хромосомах слюнных желез дрозофилы. На основании этих данных можно, исходя из теории Ли (Lea, 1946), вычислить процент нежизнеспособных перестроек и сравнить его с эмбриональной смертностью мух. Такое сравнение произведено на том же рисунке и показывает, что эмбриональную смертность можно отнести за счет цитологических повреждений. Дальнейшее подтверждение этой точки зрения дают опыты с кольцевой Х-хромосомой. В такой хромосоме значительная доля разрывов должна давать нежизнеспособные аберрации, в то время как в нормальной Х-хромосоме значительно бóльшая часть разрывов дает жизнеспособные перестройки (Bauer, 1942). Если это соответствует действительности и если в основе эмбриональной смертности лежат разрывы хромосом, то при действии тех доз в линии с кольцевой Х-хромосомой эмбриональная смертность должна быть выше. Результаты соответствующих опытов, приведенные в табл. 2, показали, что это действительно имеет место.

Таким образом, можно полагать, что во многих случаях общий эффект облучения связан первично с цитологическим поражением.

Связь лучевого поражения с обменом нуклеиновых кислот. Если результаты многих опытов говорят о связи между общим эффектом и цитологическими поражениями, то ряд данных указывает на связь последних с изменением обмена нуклеиновых кислот. Некоторые данные этого рода приводились нами раньше (Лучник, 1956а; Порядкова, Тимофеев-Ресов-

Таблица 2

Влияние рентгенизации самцов дрозофилы на эмбриональную смертность их потомства

(Н. А. Порядкова и Н. В. Лучник, неопубликованные данные)

Доза облучения (в *r*)	Самцы с нормальной хромосомой	Самцы с кольцевой хромосомой	Разница
1000	14,73 ± 0,43	19,88 ± 0,69	5,16 ± 0,81
2000	36,32 ± 0,39	45,31 ± 0,93	8,99 ± 1,00
4000	65,88 ± 0,25	80,85 ± 0,67	14,97 ± 0,83

ский и Лучник [1]), поэтому здесь мы упоминаем только немногие из них. На рис. 3 приведено уменьшение после облучения содержания дезоксирибонуклеиновой кислоты (ДНК) в клетках корневой меристемы гороха и процента делящихся клеток. Из рисунка ясно видно, что оба процесса идут параллельно.

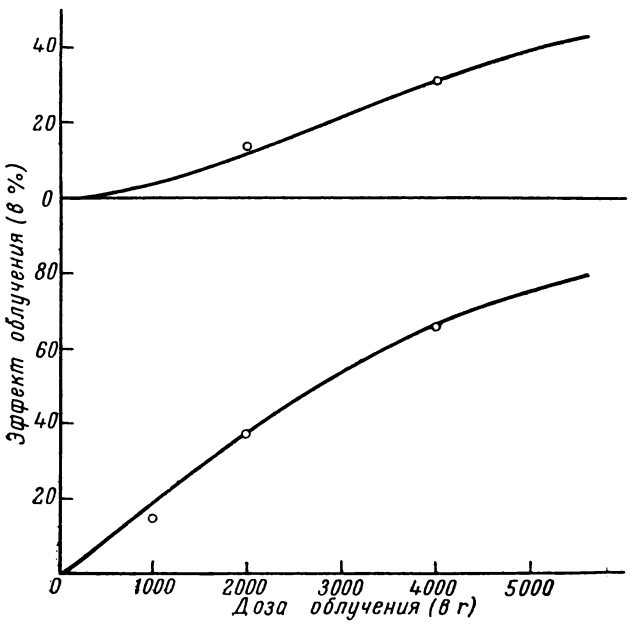


Рис. 2. Зависимость хромосомных аберраций (верхний рисунок) и эмбриональной смертности (нижний рисунок) дрозофилы от дозы γ-облучения. (Кривые построены на основании неопубликованных данных Н. В. Лучника и Е. А. Тимофеевой-Ресовской)

Некоторые данные по ненормальностям митоза через разное время после облучения приведены в табл. 3.

Из таблицы видно, что вскоре после облучения число ненормальных митозов довольно велико, затем оно уменьшается, а примерно через 4 часа после облучения снова начинает возрастать. Сопоставление этих

[1] Н. А. Порядкова, Н. В. Тимофеев-Ресовский, Н. В. Лучник. Проблема радиостимуляции растений. V. Опыты по облучению семян гороха и пшеницы рентгеновскими и γ-лучами на разных стадиях замачивания и прорастания. Статья в настоящем сборнике.

результатов с данными рис. 3 показывает, что указанное повышение совпадает по времени с падением содержания ДНК. Одновременно меняется и радиочувствительность клеток: как показывают данные той же таблицы, через 4 часа после облучения клетки оказываются более радиочувствительными, чем через 2 часа.

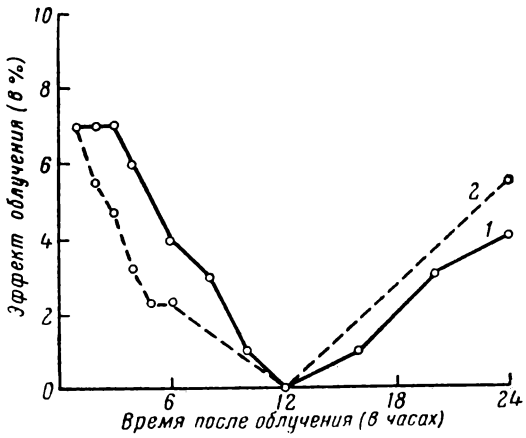


Рис. 3. Изменение во времени содержания ДНК (*1*), в условных единицах, и митотической активности *2*), в процентах после γ-сблучения проростков гороха

Опыты на мышах. Описанные выше опыты на растениях и насекомых показывают, что лучевое поражение в значительной мере происходит в результате цитологических изменений, обусловленных в свою очередь нарушением обмена нуклеиновых кислот. Чтобы выяснить, в какой мере установленная закономерность является общей, т. е. присущей и другим организмам, на мышах были поставлены опыты по определению содержания нуклеиновых кислот через разное время после облучения. Эти эксперименты были не столь подробны, как описанные выше, что определялось не только меньшим числом подопытных животных и большей трудоемкостью работы, но и поставленной задачей, заключавшейся в проверке и дополнении выводов, сделанных на основании опытов с растительным материалом.

Таблица 3

Число ненормальных митозов и радиочувствительность семян и проростков гороха через разное время после облучения

Однократное облучение проростков дозой 700 *r*				Фракционированное облучение семян дозой 5000 *r*			
время после облучения (в часах)	число исследованных анафаз	Ненормальные анафазы		интервал между облучениями (в часах)	число исследованных анафаз	ненормальные анафазы	
		число	%			число	%
1	300	214	71,3 ± 2,67	0	300	185	61,7 ± 2,82
2	250	167	67,0 ± 2,97	2	300	116	38,7 ± 2,82
4	217	182	84,0 ± 2,49	4	200	133	66,4 ± 3,33
6	109	94	86,2 ± 3,30	6	200	106	53,0 ± 3,52
8	100	83	83,0 ± 3,76	8	100	53	53,0 ± 3,76

После предварительного опыта, определившего выбор дозы облучения, исследуемого органа и времени исследования, была избрана следующая методика. Белые мыши (самки линии «Н», весившие в день облучения от 19 до 21 г) облучались тотально дозой 400 *r* γ-лучей при мощности дозы 50 *r* в 1 мин. Через 2, 9 и 16 дней часть животных умерщвлялась для определения содержания в селезенке рибонуклеиновой кислоты (РНК) и ДНК. Для этого тканевой гомогенат фракционировался по Шмидту и Танхаузеру.

Фосфор определялся на фотоэлектроколориметре по Фиске и Субарроу. Всего в опыте было 59 мышей.

Опыт показал, что при сублетальной дозе, каковой является для этих мышей 400 *r*, содержание нуклеиновых кислот в селезенке падает чрезвычайно сильно — за два дня количество ДНК уменьшается в 8, а РНК — в 10 раз (рис. 4). Правда, эти цифры создают преувеличенное представление о падении содержания нуклеиновых кислот, так как и сама селезенка при этом сильно уменьшается; поэтому правильнее относить полученные цифры не ко всему органу, а к 1 г ткани, что также отражено на

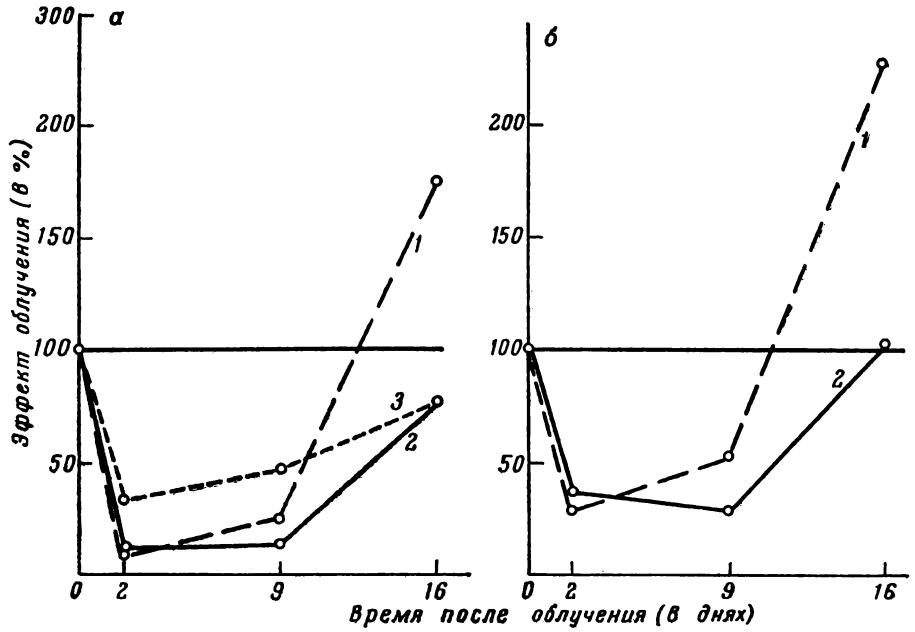


Рис. 4. Изменение во времени содержания РНК (*1*), ДНК (*2*) и веса селезенки (*3*) после тотального сблучения мышей

Цифры даны в процентах необлученного контроля в расчете на весь орган (*а*) и на 1 *г* ткани (*б*)

рис. 4. Однако и в этом случае отмечается падение примерно втрое по сравнению с необлученным контролем. Начальное падение сильнее выражено у РНК, но она же и быстрее восстанавливается. К 16-му дню содержание ДНК на 1 г селезенки соответствует таковому контрольных мышей, в то время как содержание РНК превышает контроль больше чем вдвое.

Учитывая большое постоянство содержания ДНК в клетках (Макаров, 1956), можно рассматривать колебания ее содержания как отражение динамики клеточного состава ткани. В таком случае можно сказать, что в селезенке после облучения сильно падает количество клеточных элементов. Однако хотя вес селезенки и не достигает нормы к 16-му дню, регенерация оказывается вполне полноценной — содержание клеток на единицу веса то же, что и в контроле. Такой вывод соответствует результатам описанных в литературе гистологических исследований. Эти изменения непосредственно связаны с обменом нуклеиновых кислот.

Большее начальное падение РНК показывает, что ее содержание уменьшается не только на орган или единицу веса, но и на клетку. Если считать, что на 2-й день после облучения в клетке содержится нормальное количество ДНК, то содержание РНК оказывается на 20% ниже нормы. Более быстрое восстановление РНК, переходящее в гиперрегенерацию,

указывает на роль, какую играет РНК в восстановительных процессах — факт, хорошо известный при действии других повреждающих агентов (Кедровский, 1951).

Таким образом, полученные результаты полностью подтверждают выводы, сделанные на основании опытов по облучению проростков гороха.

Закономерным выводом из всего сказанного является мысль использовать нуклеиновые кислоты или их производные, а также препараты тканей, богатых нуклеопротеидами, в качестве противолучевых средств. Поэтому мы и приступили к опытам, описанию которых посвящена настоящая работа.

Так как приведенные выше соображения с очевидностью вытекают из современных биофизических представлений, не удивительно, что примерно в то же время несколько групп радиобиологов начали до некоторой степени сходные опыты. Однако уже здесь следует подчеркнуть существенное различие между нашими опытами и экспериментами других авторов, работавших с тканевыми препаратами, богатыми нуклеопротеидами. Последние применяли строго гомопластичный материал и получили данные, говорящие о необходимости брать ткань от животных того же вида. Мы же пользовались только гетеропластическим материалом, считая, что данные таких опытов, в случае положительных результатов, должны представлять больший практический интерес и что их легче будет интерпретировать теоретически.

2. Первые опыты с рибонуклеиновой кислотой и дрожжевыми экстрактами

Получив данные, описанные в предыдущем разделе, мы вначале поставили опыты с рибонуклеиновой кислотой, давшие отрицательный результат, ввиду чего мы решили обратиться к более сложным по составу клеточным экстрактам. Как будет видно из дальнейшего, РНК в действительности не только обладает противолучевыми свойствами, но и противолучевое действие дрожжевых экстрактов следует объяснять наличием в них РНК. Тем не менее мы считаем необходимым упомянуть об этих первых неудачных опытах с РНК, так как именно полученный тогда отрицательный результат дал возможность сделать впоследствии интересные и ценные выводы о механизме действия исследуемой группы противолучевых средств.

Опыт с рибонуклеиновой кислотой. Этот опыт был поставлен на крысах, облученных рентгеновскими лучами в дозе 700 *r* (табл. 4).

Таблица 4

Влияние РНК на смертность облученных крыс

Группа животных	Число крыс в группе	Погибло к 30-му дню		Средняя продолжительность жизни (в днях)	Продолжительность жизни отдельных животных (в днях)
		число	%		
Контрольная	18	18	100	6,83	3, 4, 4, 4, 4, 4, 4, 5, 7,7 7, 8, 8, 8, 10, 12, 13, 19
Получавшая РНК . .	18	18	100	5,64	1, 3, 4, 4, 4, 4, 4, 5, 5, 6, 6, 7, 7, 7, 7,8, 8, 17

Примечание. Животные облучались дозой 700 *r* рентгеновских лучей (170 kV, 15 mA, фильтр 0,5 мм меди и 2,0 мм алюминия, расстояние 15 см, мощность дозы 12,5 *r* в 1 мин.). Рибонуклеиновая кислота вводилась внутрибрюшинно в виде 2-процентного раствора натриевой соли в количестве 30 мг/кг.

Как видно из приведенных в таблице данных, РНК оказалась совершенно неэффективной; в контроле и в опыте не оставалось в живых ни одной крысы. Нуклеиновая кислота даже несколько снизила среднюю продолжительность жизни животных, хотя разница в продолжительности жизни подопытных и контрольных крыс была статистически недостоверна.

В то время мы истолковали этот результат так: либо РНК не влияет на лучевое поражение, либо, если и влияет, то не при изолированном применении, а только в комплексе с другими веществами. В пользу последнего предположения говорили результаты, полученные Лафборо с сотрудниками (Loofbourow, Webb et al., 1947). Эти авторы обнаружили, что дрожжевые экстракты, особенно из дрожжей, облученных ультрафиолетовыми лучами, способны стимулировать деление клеток. Выяснение химической природы содержащегося в экстракте стимулятора показало, что он представляет собой целый комплекс веществ, в который, наряду с производными нуклеиновой кислоты, входят также аминокислоты и витамины группы В. Отдельно взятые компоненты этого комплекса оказывали очень слабый эффект. Поэтому мы и решили испытать в опытах с облученными организмами дрожжевые экстракты.

Опыты с дрожжевыми экстрактами. Первый ориентировочный опыт был поставлен на пяти небольших группах мышей, облученных дозой 700 *r* (ЛД 100). Дрожжевой экстракт вводился после облучения ежедневно в разных дозировках. В этом первом опыте, подробные результаты которого мы не приводим, большинство опытных животных погибло одновременно с контрольными. Только одна мышь из группы, получавшей наименьшее количество экстракта, прожила дольше месяца (в контроле все животные погибли значительно раньше). Однако подопытные животные выглядели лучше контрольных и, в частности, меньше страдали от поноса. Эти данные можно было считать лишь намеком на возможную эффективность экстрактов, но они заставили нас продолжать опыты. Последующие опыты давали эффект, но довольно незначительный, так что реальность действия дрожжевых экстрактов можно было доказать только в результате очень тщательного анализа. В качестве примера в табл. 5 приводится результат анализа одного из таких опытов.

Таблица 5

Влияние дрожжевого экстракта на смертность облученных мышей (предварительный опыт)

Показатели	Контроль	Дрожжевой экстракт	*P*
Число животных	85	16	—
Число погибших к 30-му дню	60	11	—
Процент погибших к 30-му дню	70,6 ± 4,96	68,8 ± 11,6	0,88
Процент погибших к 12-му дню (день наибольшей разницы)	62,4 ± 5,25	43,8 ± 12,4	0,16
Средняя продолжительность жизни (в днях)	8,6 ± 2,97	11,5 ± 6,8	0,70
Время гибели 50% мышей (в днях) . .	10,0 ± 0,63	15,0 ± 4,8	0,21
Наклон выпрямленной кривой смертности	1,7 ± 0,05	3,4 ± 0,9	0,02

Примечание. Мыши штамма «Х» облучались дозой 600 *r* γ-лучей при мощности дозы 10 *r* в мин. Дрожжевой экстракт вводился внутрибрюшинно по 0,5 мл в течение четырех дней.

Столь незначительный эффект мы относили за счет низкого качества дрожжей, содержавших очень большое количество мертвых клеток и бактериальных примесей. В поисках более подходящего материала мы испробовали другой сорт дрожжей (мороженые прессованные дрожжи Ленинградского завода) и здесь, в аналогичных опытах, получили более выраженный эффект, хотя и эти дрожжи содержали примеси и мертвые клетки. Результаты этого опыта приведены в табл. 6.

Таблица 6

Влияние дрожжевого экстракта на смертность облученных мышей

Доза облучения (в *r*)	Вариант опыта	Число мышей	Погибло к 20-му дню		Продолжительность жизни отдельных мышей (в днях)
			число	%	
600	Контроль	20	17	85,0	4, 4, 5, 5, 6, 7, 7, 8, 8, 9, 10, 10, 12, 13, 14, 14, 14
	Экстракт	20	4	20,0	5, 5, 8, 15
700	Контроль	12	12	100,0	3, 4, 4, 7, 7, 8, 9, 9, 10, 11, 11, 11
	Экстракт	12	9	75,0	3, 3, 5, 6, 6, 7, 8, 9, 10

Примечание. Мыши штамма «Х» облучались γ-лучами при мощности дозы около 10 *r* в 1 мин. Дрожжевой экстракт (из прессованных дрожжей Ленинградского завода) вводился внутрибрюшинно по 0,1 мл — сразу после облучения, через 24 и 48 час.

Здесь можно видеть значительное и вполне реальное снижение смертности. При дозе 600 *r* смертность снизилась с 85 до 20%, а при абсолютно летальной дозе 700 *r* 25% животных остались живы.

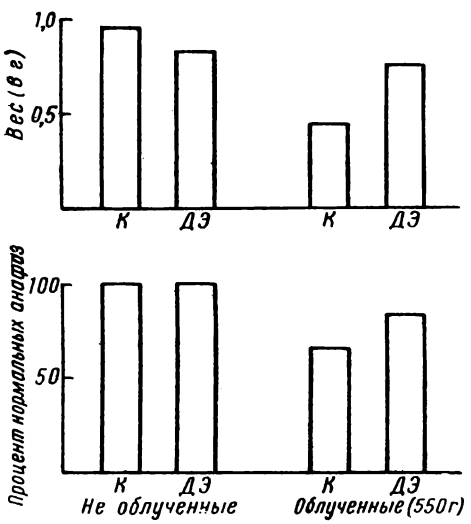


Рис. 5. Влияние дрожжевого экстракта (разведение 1 : 1 000) на рост облученного гороха и процент патологических митозов в его меристеме

К — контроль; *ДЭ* — дрожжевой экстракт

Действие этого экстракта было проверено также на других организмах. На крысах, облученных рентгеновскими лучами в дозе 550 *r*, дрожжевой экстракт реально снизил смертность животных и ускорил восстановление нормальной картины периферической крови. На растениях гороха, помещенных после облучения в раствор дрожжевого экстракта, лучевое поражение было выражено слабее, чем на растениях, развивавшихся в воде. Важно отметить, что на необлученный материал дрожжевой экстракт не оказывал стимулирующего действия, что указывает на специфическое действие экстракта на эффект облучения. Цитологическое исследование кончиков корешков облученных растений показало, что микроскопически ткани гороха, росшего на дрожжевом экстракте, меньше отклоняются от нормы, чем контрольные; особенно ясно это заметно на структурных изменениях хромосом (рис. 5).

Результаты этих опытов показали, что некоторые дрожжевые экстракты при применении после облучения заметно снижают вредное действие

ионизирующих лучей на живые организмы. В связи с тем что противолучевых средств, эффективных при применении после облучения, известно очень мало, дрожжевые экстракты заслуживали самого внимательного и подробного изучения.

Уже после получения первых результатов стали ясны основные четыре вопроса, нуждавшиеся в разрешении. Первый и самый естественный в таких случаях вопрос касался нахождения оптимальной дозы, установления «терапевтического индекса» и нахождения наиболее рациональных способов применения экстрактов.

Второй вопрос касался нахождения способа консервирования экстрактов. Дрожжевой экстракт служил превосходной средой для развития микроорганизмов, в связи с чем свежеприготовленный экстракт уже на следующее утро становился совершенно мутным от большого числа микробов. Из-за этого в первых опытах приходилось готовить экстракты только ex temporе, что, разумеется, было очень неудобно.

Третий вопрос касался нахождения условий, влияющих на эффективность дрожжевых экстрактов. Как уже было сказано, вначале, до нахождения этих условий, далеко не все экстракты давали такой стойкий и значительный эффект, как в только что описанных опытах.

Наконец, четвертый вопрос заключался в выяснении химической природы противолучевого вещества, содержащегося в экстрактах (или веществ, если противолучевое действие связано с наличием определенного комплекса).

3. Влияние дозировки дрожжевого экстракта на противолучевой эффект

Опыты по выяснению зависимости противолучевого эффекта от дозировки экстракта были поставлены на белых мышах и на проростках гороха (в последнем случае исследовались как подавление роста, так и цитологические изменения).

Влияние экстракта на смертность мышей. Опыты на белых мышах, поставленные с пятью дозировками экстракта, показали, что снижение смертности облученных животных наблюдается при введении мышам от 0,1 до 0,6 мл экстракта на животное; оптимум лежит около 0,3 мл (табл. 7).

Таблица 7

Влияние дозировки дрожжевого экстракта на смертность облученных мышей

Дозировка (в мл)	Число мышей	Погибло к 20-му дню		Продолжительность жизни отдельных мышей (в днях)
		число	%	
Контроль	24	18	75,0	4, 5, 5, 6, 7, 7, 7, 8, 8, 10, 10, 10, 12, 12, 12, 13, 14, 14
0,15	15	9	60,0	4, 4, 4, 5, 8, 9, 12, 12, 17,
0,30	15	2	13,3	17, 20
0,60	14	9	64,3	2, 2, 4, 7, 8, 10, 14, 16, 19
1,20	17	14	82,3	3, 4, 5, 5, 5, 5, 6, 8, 9, 9, 9, 12, 13, 14
2,40	12	12	100,0	2, 3, 4, 5, 5, 5, 5, 5, 7, 7, 9, 12

Примечание. Мыши «X» облучались дозой 600 *r* γ-лучей при мощности дозы около 10 *r* в 1 мин. Указанные дозировки делились на три части, вводившиеся внутрибрюшинно сразу после облучения, через 24 и 48 час.

На рис. 6 изображены кривые смертности мышей. Рассматривая этот рисунок, можно заметить, что противолучевое действие экстрактов распределено во времени неравномерно. Снижение смертности особенно заметно в средние сроки — от 6-го до 14-го дня. Вначале подопытные животные погибают в несколько большем числе, чем контрольные, причем это наблюдается даже в некоторых группах, где к концу опыта смертность оказалась ниже контрольной, что нельзя объяснить токсичностью дрожжевых экстрактов, так как примененные дозировки значительно ниже токсических (см. ниже). Это обстоятельство легко объяснимо с точки зрения теории пиков смертности (Лучник, 1957), согласно которой гибель

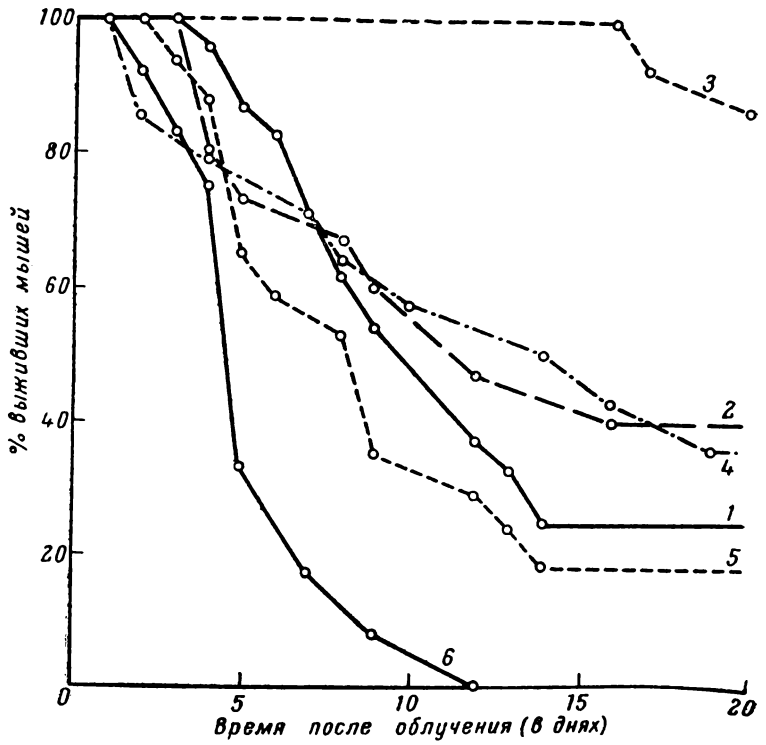


Рис. 6. Влияние разных количеств дрожжевого экстракта, вводимого после облучения, на смертность мышей

1 — контроль; *2* — 0,15 *мг*; *3* — 0,3 *мг*; *4* — 0,6 *мг*; *5* — 1,2 *мг*; *6* — 2,4 *мг* на животное

животных в разные сроки после облучения происходит за счет разных механизмов. Очевидно, дрожжевые экстракты снижают смертность не от всех возможных причин, а только от некоторых.

В рассмотренном опыте варьировалось только общее количество вводимого экстракта, число и время инъекций оставались неизменными. Все мыши получали по три инъекции: непосредственно после облучения, через сутки и двое суток после него. Влияние числа и времени инъекций было изучено в специальных опытах, показавших, что если такое же количество экстракта (0,1 мл) вводить ежедневно в течение 12 дней или вводить его трижды, но начиная с 4-го дня после облучения, то снижения смертности не наблюдается (табл. 8).

Как показал другой опыт, если вводить всю дозу экстракта (0,3 мл) однократно или делить ее на три инъекции, осуществляемые через день, то получается одинаковый результат (табл. 9). При однократном введении

Таблица 8

Влияние числа инъекций и сроков введения дрожжевого экстракта на смертность облученных мышей

Число инъекций	Дни введения	Число мышей	Погибло к 20-му дню		Продолжительность жизни отдельных мышей (в днях)
			число	%	
Контроль		10	10	100,0	4, 9, 11, 13, 13, 13, 13, 13, 13, 18
3	0—2	10	5	50,0	6, 9, 10, 12, 13
3	4—6	10	10	100,0	8, 8, 9, 9,9,10, 10, 11, 12,15
12	0—11	9	9	100,0	4, 5, 6, 8, 8, 8, 8, 16, 18

Примечание. Мыши штамма «К» облучались дозой 600 *r* γ-лучей при мощности дозы около 10 *r* в 1 мин. Дрожжевой экстракт вводился по 0,1 мл внутрибрюшинно в указанные сроки. За нулевой день принят день облучения.

Таблица 9

Влияние фракционирования общей дозы дрожжевого экстракта на смертность облученных мышей

Вариант опыта	Число мышей	Погибло к 20-му дню		Продолжительность жизни отдельных мышей (в днях)
		число	%	
Контроль	16	12	75,0	8, 9, 10, 10, 10, 10, 13, 13, 14, 14, 15, 17
Однократное введение 0,3 мл	16	4	25,0	10, 10, 11, 16
Трехкратное введение 0,1 мл	16	6	37,5	6, 8, 8, 8, 10, 12

Примечание. Мыши-самцы штамма «Н» облучались дозой 650 *r* γ-лучей при мощности дозы около 50 *r* в 1 мин. Половине подопытных животных вводили 0,3 мл экстракта сразу после облучения, а остальным в виде инъекций по 0,1 мл в течение трех дней.

даже наблюдается несколько меньшая смертность, но разница между обеими подопытными группами оказывается статистически недостоверной.

Чтобы убедиться в нетоксичности примененных дозировок экстракта, был поставлен следующий опыт. Группе белых мышей ежедневно в течение 12 дней вводили дрожжевой экстракт в количестве 0,5 мл, т. е. в дозе значительно превышавшей применявшуюся в опытах по облучению. Ни одно из животных не погибло и не обнаруживало никаких признаков заболевания. В то время из-за нехватки подопытного материала токсичность интересовавших нас веществ испытывалась на бракованных животных (старых, слабых, больных, покусанных), которые не могли быть использованы в основных опытах по облучению. Такие же животные были взяты и для испытания токсичности применяемых доз дрожжевых экстрактов. К концу опыта эти мыши стали выглядеть значительно лучше, у них повысился аппетит, возросла активность животных, улучшился экстерьер. В частности, у нескольких мышей, у которых в начале опыта почти не было шерсти на спине, через две недели появился нормальный волосяной покров.

Резюмируя, можно сказать, что оптимальная доза дрожжевого экстракта составляет около 0,3 мл на мышь, что соответствует 15 мл на 1 кг

живого веса и является совершенно безвредной дозировкой. Для достижения эффекта это количество может быть введено однократно или разделено на три инъекции.

Влияние экстракта на рост гороха. В опытах по влиянию дрожжевого экстракта на рост гороха применялись разведения от 1 : 10 до 1 : 100 000. При действии на необлученные проростки наивысшей концентрации наблюдалось некоторое уменьшение веса и увеличение отношения веса корней к весу надземной массы. Более сильные разведения (начиная от 1 : 100) не оказывали на необлученные проростки гороха никакого видимого эффекта. Результаты действия дрожжевого экстракта на проростки, облученные дозой 500 *r*, приведены в табл. 10.

Таблица 10

Влияние разных концентраций дрожжевого экстракта на вес проростков гороха, облученных дозой 500 *r* γ-лучей

Вариант опыта	Общий вес		Вес надземной массы		Вес корней	
	в мг	в % контроля	в мг	в % контроля	в мг	в % контроля
Не облученный контроль	890	—	585	—	305	—
Облученный контроль	553	100	360	100	193	100
Разведение:						
1 : 10	596	107	358	99	238	123
1 : 100	638	114	433	120	205	106
1 : 1 000	708	127	480	133	228	118
1 : 10 000	653	117	453	126	200	103
1 : 100 000	628	112	413	115	215	111

Примечание. Проростки облучались при мощности дозы около 10 *r* в 1 мин. Каждая цифра — среднее по 40 проросткам 10-дневного возраста.

Из таблицы видно, что все примененные концентрации дрожжевых экстрактов уменьшают вызванное облучением подавление роста; наилучший эффект дает разведение 1 : 1000.

Влияние на цитологические изменения. В этих опытах действие дрожжевого экстракта было испытано в широком интервале концентраций. В необлученных клетках дрожжевой экстракт не вызывал ненормальных митозов или других видимых изменений. При действии на облученные клетки, как и в опытах по влиянию на рост гороха, наилучший эффект оказало разведение 1 : 1000; в этом случае процент ненормальных митозов уменьшился очень значительно — почти в четыре раза. Более слабые концентрации оказывали несколько меньший эффект, однако, как видно из табл. 11, даже при разведении 1 : 100 000 000 число ненормальных митозов реально уменьшалось по сравнению с контролем.

На основании всей совокупности опытов, проведенных на мышах и на горохе, можно сделать общее заключение, что дрожжевой экстракт представляет собой нетоксичный препарат, оказывающий противолучевой эффект в очень широком интервале дозировок. Вполне естественно, что для такого комплексного процесса, как снижение смертности млекопитающих, этот интервал заметно у́же, чем для цитологических эффектов. Для всех изучавшихся эффектов существует оптимальная концентрация.

Таблица 11

Влияние разных концентраций дрожжевого экстракта на процент ненормальных анафаз, вызванных в меристеме гороха γ-лучами

Доза облучения (в *r*)	Разведение дрожжевого экстракта	Число исследованных клеток	Число ненормальных клеток	Процент ненормальных клеток	χ^2	*P*
500	Контроль	200	70	35,0	—	—
	1 : 100	150	23	15,3	16,9	0,00004
	1 : 1 000	182	17	9,3	35,8	$2{,}10^{-9}$
	1 : 10 000	100	17	17,0	10,5	0,001
	1 : 100 000	100	22	22,0	5,3	0,02
6·5	Контроль	100	45	45,0	—	—
	1 : 100 000	100	17	17,0	18,4	0,00002
	1 : 1 000 000	100	20	20,0	14,3	0,0002
	1 : 10 000 000	127	31	24,4	10,7	0,001
	1 : 100 000 000	130	39	30,0	5,5	0,02
	1 : 1 000 000 000	100	32	32,0	3,6	0,06

4. Изготовление препарата, обладающего постоянными свойствами

Как уже говорилось выше, серьезным неудобством при работе с дрожжевыми экстрактами была невозможность их длительного хранения. Поэтому необходимо было разработать метод получения препарата, длительное время обладающего теми же свойствами, что и свежеприготовленный экстракт. Для этого мы применили следующий довольно простой способ. Свежий дрожжевой экстракт выпаривался в вакууме при температуре 40° С до образования густой жидкости бурого цвета, которая затем помещалась в вакуум-эксикатор над серной кислотой. В результате был получен сильно гигроскопический порошок бурого цвета, который, после растворения его в воде, обладает всеми свойствами свежего экстракта. Выход сухого вещества составляет около 3% от исходного количества экстракта.

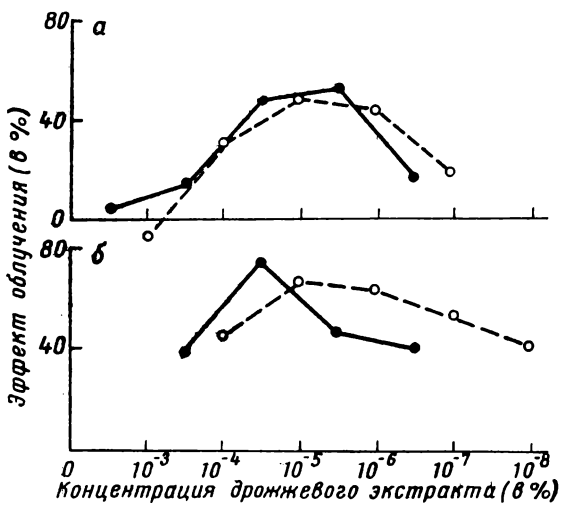


Рис. 7. Сравнение защитного эффекта свежего экстракта (сплошные линии) и постоянного препарата (штриховые линии) при подавлении роста гороха (*а*) и появлении ненормальностей митоза (*б*) в результате облучения

На рис. 7 графически сопоставляется действие свежего дрожжевого экстракта и постоянного препарата на рост облученного гороха и процент ненормальных митозов. На рисунке изображен защитный эффект, определявшийся как снимаемый дрожжевым экстрактом процент лучевого поражения. Хорошее соответ-

ствие результатов по обоим препаратам говорит за то, что при таком способе переработки дрожжевой экстракт не теряет своих противолучевых свойств.

Аналогичные опыты на мышах, представленные в табл. 12, показывают, что и в этом случае свежий дрожжевой экстракт и постоянный препарат обусловили сходное снижение смертности.

Таблица 12

Влияние на смертность облученных мышей «Х» свежего дрожжевого экстракта и полученного из него постоянного препарата

Вариант опыта	Число мышей	Смертность к 20-му дню		Продолжительность жизни отдельных мышей (в днях)
		число	%	
Свежий экстракт	15	2	13,3	17, 20
Контроль	15	11	73,4	4, 5, 5, 7, 7, 8, 10, 12, 12, 13, 14
Постоянный препарат	12	3	25,0	10, 14, 16
Контроль	12	7	58,3	6, 9, 10, 14, 16, 17, 17

Примечание. Мыши облучались дозой 600 *r*. Свежий экстракт вводился им после облучения в количестве 0,3 мг на мышь, а постоянный препарат — по 200 мг/кг.

5. Об условиях, влияющих на эффективность дрожжевых экстрактов

При продолжении опытов, описанных в предыдущих разделах, нам пришлось столкнуться со значительной изменчивостью результатов, которые давало введение дрожжевого экстракта мышам после облучения. В табл. 13 приведены результаты трех последовательных серий опытов, в которых мышам «Х», облученным дозой 600 *r*, вводилось одинаковое количество дрожжевого экстракта, изготовленного из одной и той же партии дрожжей, сохранявшихся в первом случае при температуре +4° С, во втором — 8 и в третьем — 12° С.

Таблица 13

Изменчивость результатов опытов с дрожжевым экстрактом

Серия опыта	Вариант опыта	Число мышей	Смертность к 20-му дню		Продолжительность жизни отдельных мышей (в днях)
			число	%	
1	Экстракт	15	2	13,3	17, 20
	Контроль	15	11	73,4	4, 5, 5, 7, 7, 8, 10, 12, 12, 13, 14
2	Экстракт	29	17	58,7	4, 4, 5, 6, 8, 8, 10, 10, 12, 12, 13, 15, 16, 18, 19, 19
	Контроль	29	18	62,0	3, 4, 5, 6, 6, 7, 7, 7, 8, 9, 9, 10, 11, 12, 13, 14, 15
3	Экстракт	20	12	60,0	6, 6, 9, 10, 10, 12, 13, 16, 16, 16, 18, 19
	Контроль	20	10	50,0	4, 9, 11, 13, 13, 13, 13, 13, 13, 18

Примечание. Условия опыта такие же, как в табл. 6 и 7.

Если в первой серии дрожжевой экстракт оказывает значительное и вполне реальное снижение смертности, то во второй серии это снижение

минимально, а в третьей — наблюдается даже некоторое повышение смертности от применения экстракта.

Следует заметить, что дрожжевые экстракты в разных сериях несколько отличались один от другого по внешнему виду: в первой серии он был темнее и меньше опалесцировал; это заставляет думать, что дрожжи каким-то образом изменились за время хранения. Первым фактором, влияние которого мы решили проверить, была температура. Вначале, когда ставилась первая серия опытов, дрожжи хранились в холодильнике при температуре +4° С, а затем из-за неисправности холодильника были перенесены на мороз, причем температура их перед постановкой второй серии опытов была около —8° С, а перед третьей — около —12° С.

Влияние температуры. К выяснению влияния температуры мы приступили примерно через год после описанных выше опытов, так как летом мы не имели возможности поддерживать низкие температуры и длительно хранить дрожжи. Чтобы исключить воздействие и взаимодействие неконтролируемых факторов, ряд условий был изменен: были взяты мыши другого штамма — не «Х», а «М», облучение производилось с интенсивностью в пять раз большей, биологическая доза была выше, порядка ЛД 100 (физическая доза из-за большей чувствительности этого штамма мышей была на 100 *r* меньше), для получения экстракта использовались дрожжи не Ленинградского, а Воронежского завода. Особенно важно то, что опыты ставились в обратной последовательности — не от высоких температур к низким, а наоборот — от низких к высоким. Дрожжи хранились в термостате, температура в котором поддерживалась с точностью ±1° С. Все опыты, результаты которых приведены в табл. 14, были проведены с дрожжами не только из одной партии, но и из одной и той же пачки.

Таблица 14

Влияние температуры, при которой хранились дрожжи, на лечебные свойства дрожжевого экстракта

Температура хранения дрожжей (в °С)	Вариант опыта	Число мышей	Погибло к 20-му дню		Продолжительность жизни отдельных мышей (в днях)
			число	%	
—8	Экстракт	12	10	83,3	4, 4, 5, 6, 7, 7, 8, 9, 9, 10
	Контроль	12	11	91,7	6, 6, 7, 7, 11, 11, 11, 11, 13, 16, 17
+4	Экстракт	12	8	66,7	4, 4, 9, 9, 10, 10, 13, 17
	Контроль	12	12	100,0	4, 6, 7, 7, 8, 8, 10, 10, 10, 12, 13, 14
+8	Экстракт	12	12	100,0	2, 3, 3, 3, 3, 5, 6, 6, 8, 9, 11, 12
	Контроль	12	10	83,3	2, 4, 4, 4, 6, 8, 8, 17, 17, 18

Примечание. Опыт поставлен на мышах штамма «М», облученных дозой 500 *r* γ-лучей при мощности дозы около 50 *r* в 1 мин. Экстракт приготовлялся из дрожжей, хранившихся при указанной температуре, и вводился облученным мышам трижды по 0,1 мл.

Из таблицы видно, что и в этой серии опытов реальный положительный эффект дал только экстракт, полученный из дрожжей, хранившихся при температуре +4° С.

Интересно сравнить результаты, приведенные в табл. 13 и 14. Непосредственно сравнивать процентное снижение смертности нельзя из-за разной контрольной смертности; кривые зависимости смертности от дозы

облучения имеют S-образную форму, благодаря чему одинаковому снижению эффективной дозы соответствует при разной контрольной смертности разное снижение смертности. Если, например, какое-либо средство повышает ЛД 50 для мышей штамма «Х» на 100 *r*, то при дозе 500 *r* оно понизит их смертность на 50%, а при дозе 750 *r* всего лишь на 10%. Поэтому, чтобы сделать возможным непосредственное сравнение полученных цифр, проценты были выражены в пробитах; при этом одинаковому снижению эффективной дозы при любой контрольной смертности должны соответствовать одинаковые цифры (при 100% смертности мы для получения конечных разностей исходили из семи пробитов).

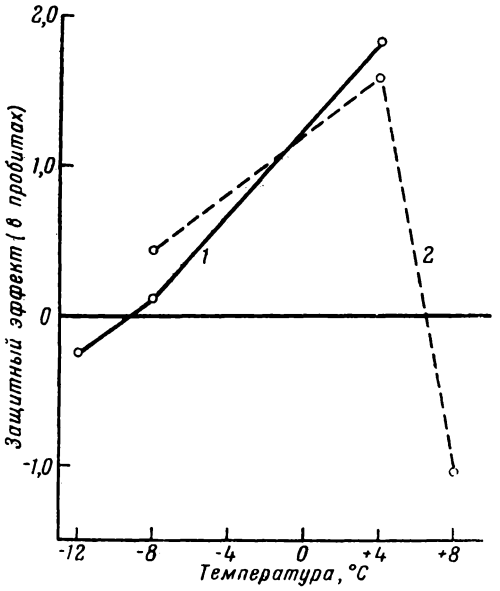


Рис. 8 Влияние температуры на терапевтические свойства дрожжевых экстрактов

1 — первая серия опытов; *2* — вторая серия опытов. По ординате — разница пробитов смертности в опыте и контроле

Результаты такой обработки изображены на рис. 8. Совпадение между обеими сериями получается очень хорошим. Это является дополнительным подтверждением того, что основным фактором, влиявшим в этих опытах на эффективность дрожжевого экстракта, была температура, при которой дрожжи хранились перед извлечением из них экстрактов. Реальное отклонение от контроля дали только группы, которым вводился экстракт из дрожжей, хранившихся при температуре +4° С. Однако ввиду очень хорошего совпадения результатов обеих серий, мы считаем возможным говорить о слабом положительном эффекте экстракта из дрожжей, хранившихся при температуре — 8° С, и о слабом отрицательном действии экстрактов из дрожжей, хранившихся при температуре —12° С и +8° С. Нельзя не отметить, что подобные температурные условия, обеспечивающие получение эффективных экстрактов, совпадают с теми, которые В. П. Филатов считал оптимальными для образования биогенных стимуляторов (по мнению В. П. Филатова, биогенные стимуляторы образуются при условиях, подавляющих жизнедеятельность, но полностью ее не останавливающих). В этой связи нами в дальнейшем было экспериментально изучено действие на дрожжевые клетки перед извлечением из них экстракта других повреждающих агентов — высушивания и ионизирующей радиации.

Влияние высушивания. Высушивание представляется особенно подходящим методом воздействия на дрожжи с целью получения биогенных стимуляторов не только из-за его простоты, но и потому, что многолетней практикой хлебопечения твердо установлено, что высушенные дрожжи в течение очень долгого времени не теряют жизнеспособности. Для опытов были взяты сухие дрожжи фабричного изготовления — пекарские и пивные — и из них приготовлен обычным способом экстракт. Применение его на облученных мышах показало, что из высушенных дрожжей, так же как и из подвергавшихся охлаждению, можно приготовить эффективный экстракт (табл. 15).

Таблица 15

Влияние высушивания дрожжей на лечебные свойства экстракта

Тип экстракта	Число мышей	Погибло к 20-му дню		Продолжительность жизни отдельных мышей (в днях)
		число	%	
Из сушеных пекарских дрожжей	12	7	58,3	4, 8, 9, 10, 12, 15, 17
Из сушеных пивных дрожжей	12	6	50,0	8, 9, 12, 15, 16, 20
Контроль	12	11	91,7	6, 6, 7, 7, 11, 11, 11, 11, 13, 16, 17

Примечание. Условия опыта такие же, как в табл. 14.

Эти результаты интересны с практической точки зрения, так как сухие дрожжи легко доступны и изготовление экстракта из них не требует никаких дополнительных манипуляций. Правда, при этом специального исследования требует вопрос о том, всякие ли сухие дрожжи дают активные препараты, так как здесь может играть роль способ их изготовления, в частности скорость высушивания.

Влияние лучистой энергии. После выяснения влияния на свойства дрожжевого экстракта таких неспецифических воздействий, как температура и высушивание, представлялось интересным изучить действие специфического повреждающего агента, каким являются ионизирующие лучи. Чтобы сделать возможным количественное сравнение, экстракты испытывались на мышах штамма «М», облученных в тех же дозах и условиях, что и в опытах по действию на экстракты температуры и высушивания. Для изготовления экстрактов прессованные пекарские дрожжи помещались в питательную среду Ридера в модификации М. Н. Мейселя (1950) и подвергались облучению γ-лучами в дозах 5000 и 25 000 *r*. Облучение производилось в течение суток, так как известно, что количество стимуляторов роста увеличивается при медленном умерщвлении дрожжей ультрафиолетовыми лучами и не изменяется при быстром воздействии тех же доз (Loofbourow et al., 1947). Еще одна порция дрожжей была помещена в ту же среду, но не подвергалась облучению. Из всех трех культур были приготовлены экстракты.

Как видно из табл. 16, экстракт из дрожжей, облученных дозой 5000 *r*, дал реальную разницу не только по сравнению с контролем, но и

Таблица 16

Влияние облучения дрожжей на лечебные свойства экстракта

Доза облучения дрожжей (в *r*)	Число мышей	Смертность к 20-му дню		Продолжительность жизни отдельных мышей (в днях)
		число	%	
0	12	11	91,7	4, 6, 8, 10, 11, 11, 11, 12, 13, 18, 19
5 000	12	6	50,0	3, 7, 11, 13, 14, 18
25 000	12	8	66,7	1, 4, 5, 9, 10, 11, 11, 19
Контроль	12	12	100,0	4, 7, 7, 9, 10, 10, 13, 14, 15, 17, 17, 17

Примечание. Условия опыта такие же, как в табл. 14.

по сравнению с подопытными мышами, получившими экстракт из необлученных дрожжей.

При дозе 25 000 *r* эффект оказался меньше, но был статистически реальным. Не следует удивляться тому, что экстракт из контрольных необлученных дрожжей не обеспечил реальной защиты — эти дрожжи хранились при комнатной температуре, а выше мы показали, что дрожжевой экстракт из дрожжей, не подвергавшихся дополнительным воздействиям, оказывает эффект только в том случае, если дрожжи хранятся при температуре, неблагоприятной для их развития.

Описываемые опыты показывают, что самые разнообразные повреждающие воздействия (низкая температура, высушивание, облучение) вызывают в дрожжевых клетках какие-то изменения, в результате которых получаемый из них экстракт приобретает свойство уменьшать вредное действие, оказываемое ионизирующими лучами на живые организмы. Сильные воздействия теми же агентами вызывают гибель дрожжевых клеток (низкая температура, чрезмерно большая доза лучей); лечебные свойства экстрактов при этом, естественно, уменьшаются.

Эти данные подтверждают нашу первоначальную точку зрения о сходстве между дрожжевыми экстрактами и биогенными стимуляторами. В пользу этого говорит и сходство их физико-химических свойств. Согласно В. П. Филатову, биогенные стимуляторы термостабильны, водорастворимы, не являются белками и не обладают видовой специфичностью. Точно так же действующее начало дрожжевых экстрактов растворимо в воде, выдерживает кипячение, не обладает видовой специфичностью, так как, будучи выделено из дрожжей, оказывает эффект на мышах и горохе; в следующем разделе будет показано, что оно не является белковым телом.

Все это позволяет думать, что действующее начало дрожжевых экстрактов принадлежит к группе биогенных стимуляторов.

6. О химической природе действующего начала дрожжевых экстрактов

Идентификация действующего начала дрожжевых экстрактов с биогенными стимуляторами ничего не говорит о его химической природе, так как химическая природа биогенных стимуляторов до сих пор окончательно не установлена. В. П. Филатов считал, что биогенные стимуляторы представляют собой сложный комплекс различных веществ. Будучи с ним вполне согласны, мы думаем, что в отдельных случаях роль стимуляторов может принадлежать разным веществам. Поэтому, если бы даже химическая природа биогенных стимуляторов была с достоверностью установлена в каком-либо определенном случае, это не снимало бы необходимости исследовать ее в других.

В этом разделе будут описаны наши опыты, поставленные с целью установления химической природы действующего начала дрожжевых экстрактов.

Опыты с отдельными компонентами дрожжевых экстрактов. Как уже отмечалось, дрожжевые экстракты были применены нами под влиянием работ Лафборо и его сотрудников. Поэтому, приступая к выяснению химической природы действующего начала дрожжевых экстрактов, мы в первую очередь испытали действие тех компонентов, которые играют роль в экстрактах, исследованных Лафборо, каковыми являются аминокислоты, витамины группы В и производные нуклеиновой кислоты. Ввиду того что при такой проверке необходимо испытывать разные концентрации исследуемых веществ, соответствующие опыты были поставлены на проростках гороха как на более массовом материале. Сразу же после облучения дозой

600 *г* проростки помещались в растворы ферментативного гидролизата казеина, смеси витаминов (тиамин, рибофлавин, пиридоксин, фолиевая кислота и никотинамид), рибонуклеиновой кислоты (РНК) и дрожжевых экстрактов. Все вещества применялись в пяти разных концентрациях от 0,1 до 0,00001%. Результаты этого опыта, поставленного в нескольких повторностях, изображены на рис. 9, где показан рост растений в процентах от контроля, облученного той же дозой, но развивавшегося в чистой воде. Полученные результаты дают возможность с полной уверенностью отбросить предположение о возможной роли аминокислот и витаминов (следует заметить, что некоторые из этих веществ, как явствует из литературных данных и наших собственных опытов, оказывают эффект, если их применять до облучения). Что касается РНК, то она, в отличие от описанных выше предварительных опытов, оказала положительный эффект, количественно сравнимый с эффектом дрожжевого экстракта.

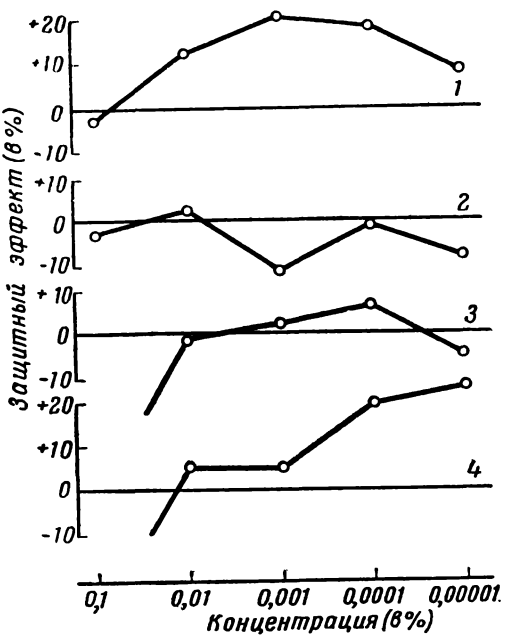


Рис. 9. Влияние на рост облученного гороха разных концентраций дрожжевого экстракта (*1*), смеси аминокислот (*2*) смеси витаминов (*3*) и рибонуклеиновой кислоты (*4*) (защитный эффект— в % к облученному контролю)

Исключение роли белков. Если в отношении других макрокомпонентов дрожжевого экстракта вопрос о их роли решается довольно легко изолированным применением этих веществ, то с белками дело обстоит не так просто ввиду сложности и многообразия белковых тел и их чувствительности к различным воздействиям. Для выяснения вопроса о том, влияют ли белки на исследуемые свойства дрожжевого экстракта, были использованы два пути — аналитический и экспериментальный. Вначале мы убедились в том, что белковые тела, входящие в состав дрожжевого экстракта, почти нацело гидролизуются до аминокислот (неэффективность последних была установлена выше), а затем испытали на облученных мышах экстракт, полностью очищенный от следов белка.

Для установления наличия полимерного белка использовались реакции осаждения с сульфосалициловой или азотной кислотой и с хлороформом; для обнаружения аминокислот — реакция с нингидрином, для пептидов — биуретовая реакция. Применялась также ксантопротеиновая реакция. Всего было исследовано на содержание белка и продуктов его распада пять образцов экстракта; для сравнения те же реакции проводились также с гидролизатом казеина, яичным альбумином и дистиллированной водой.

На основании результатов анализов, приведенных в табл. 17, можно сказать, что в исследованных экстрактах присутствовало большое количество аминокислот, немного пептидов и следовые количества белка. Трудно было ожидать, чтобы столь малые количества белка могли играть какую-либо роль. Тем не менее мы поставили специальный опыт с целью испытать экстракт, полностью очищенный от белка обработкой хлороформом.

Таблица 17

Результаты исследования дрожжевых экстрактов на наличие белковых тел

Препарат	Реакция окрашивания			Реакция осаждения с		
	нингидриновая	биуретовая	ксантопротеиновая	сульфосалициловой кислотой	азотной кислотой	хлороформом
Экстракт № 1	++++	+	?	—	—	+
Экстракт № 2	++++	+	?	±	—	+
Экстракт № 3	++++	++	?	+	?	++
Экстракт № 4	++++	+	?	±	—	+
Экстракт № 5	++++	+	?	±	—	+
Гидролизат казеина	++++	±	—	—	—	±
Альбумин	+	++++	++++	++++	++++	++++
Вода	—	—	—	—	—	—

Примечание. Результаты оценивались визуально по шестибалльной системе (от ++++ до —). О результатах ксантопротеиновой реакции было трудно судить из-за желтой окраски экстрактов.

Как видно из табл. 18, исходный и очищенный экстракты обусловили одинаковое снижение смертности облученных мышей.

Таким образом, можно утверждать, что в исследованных экстрактах содержатся только следы белков и что эти количества белка не влияют на защитные свойства дрожжевых экстрактов.

Таблица 18

Влияние обычного дрожжевого экстракта и очищенного от белка на смертность облученных мышей

Тип экстракта	Вариант опыта	Число мышей	Погибло к 30-му дню		Продолжительность жизни отдельных мышей (в днях)
			число	%	
Исходный	Экстракт	10	3	30,0	10, 12, 14
	Контроль	10	7	70,0	6, 9, 10, 13, 13, 13, 29
Очищенный	Экстракт	10	3	30,0	13, 13, 16
	Контроль	10	6	60,0	9, 11, 13, 13, 18, 24

Примечание. Мыши штамма «К» облучались дозой 500 *r* γ-лучей при мощности дозы около 10 *r* в 1 мин. Экстракты вводились мышам по 0,3 мл внутрибрюшинно, непосредственно после облучения. Очистка от белка производилась путем осаждения хлороформом по Зевагу.

Роль нуклеиновой кислоты. Рассмотренные выше опыты с отдельными компонентами дрожжевых экстрактов делают очень вероятным предположение, что свойства последних обусловлены наличием в них нуклеиновой кислоты. Однако опыт с нуклеиновой кислотой, поставленный раньше на крысах, дал отрицательный результат. Поэтому, чтобы убедиться в эффективности нуклеиновой кислоты не только на растительных, но и на животных объектах, нами были поставлены опыты на мышах, на которых испытывались оба образца нуклеиновой кислоты. Эти опыты, результаты которых приведены в табл. 19, показали, что нуклеиновая кислота, снизившая эффект облучения на растениях, оказала аналогичное действие и на мышей. Между тем, препарат, давший отрицательный результат в опытах с крысами, оказался неэффективным и на мышах.

Таблица 19

Влияние двух разных образцов рибонуклеиновой кислоты на смертность мышей

Вариант опыта	Число мышей	Погибло к 20-му дню		Продолжительность жизни отдельных мышей (в днях)
		число	%	
РНК № 1	12	11	91,7	4, 4, 5, 5, 6, 10, 12, 15, 15, 17
Контроль	12	10	83,3	3, 4, 5, 10, 10, 11, 12, 12, 13, 14
РНК № 2	12	3	25,0	10, 11, 17
Контроль	12	10	83,3	2, 7, 7, 8, 8, 9, 11, 11, 16, 17

Примечание. Мыши штамма «М» облучались дозой 500 *r* γ-лучей; РНК вводилась внутрибрюшинно (половине животных каждой группы по 0,1 мг и половине по 1 мг).

Ясно, что эта разница объясняется какими-то различиями в свойствах применявшихся нуклеиновых кислот. При этом, конечно, не была исключена возможность того, что не только нуклеиновая кислота является действующим началом в исследуемых экстрактах. Для исключения возможной роли других компонентов, которые могут иметь самостоятельное значение или усиливать действие нуклеиновых кислот, был поставлен специальный опыт. Из раствора дрожжевого экстракта была осаждена спиртом в кислой среде нуклеиновая кислота, подвергнутая затем тщательной очистке органическими растворителями, после чего на облученных мышах сравнивалось действие этой нуклеиновой кислоты и цельного экстракта. Оба препарата, как показывает табл. 20, оказали примерно одинаковый эффект.

Таблица 20

Влияние нуклеиновокислотной фракции дрожжевого экстракта на смертность мышей штамма «М», облученных дозой 500 *r* γ-лучей

Вводимое вещество	Дозировка (в мг)	Число мышей	Погибло к 30-му дню		Продолжительность жизни отдельных мышей (в днях)
			число	%	
Исходный экстракт . . .	4	12	7	58,3	7, 10, 12, 12, 14, 17, 20
Выделенная РНК	1	12	6	50,0	9, 11, 14, 25, 27, 29
Контроль . . .	—	12	11	91,7	2, 7, 7, 8, 8, 9, 11, 11, 16, 17, 24

Эти опыты еще больше подкрепляют сделанный раньше вывод, что действие дрожжевых экстрактов на облученный организм связано с наличием в них РНК. Правда, не все образцы рибонуклеиновой кислоты обладают таким действием, что могло бы быть связано с наличием каких-либо примесей, осаждающихся с нуклеиновой кислотой. Чтобы исследовать эту возможность, были поставлены описываемые ниже опыты.

Эффективность экстракта и содержание в нем фосфора. Если лечебные свойства дрожжевого экстракта обусловлены наличием в нем нуклеиновых кислот, а присутствие других компонентов не играет роли, то эффективность дрожжевого экстракта должна коррелировать с содержанием в нем нуклеиновых кислот. О содержании же нуклеиновых кислот можно судить по общему количеству фосфора, так как при экстракции водой наличие в экстрактах фосфолипидов невозможно, а другие фосфорсодержа-

щие вещества не могут оказать существенного влияния на результат ввиду их низкого, по сравнению с нуклеиновой кислотой, содержания.

С этой целью было определено содержание фосфора в пяти образцах дрожжевых экстрактов, испытанных на облученных мышах. Фосфор определялся весовым способом. Материал сжигался азотной кислотой с пергидролем. В аликвотной пробе фосфор осаждался молибденовокислым аммонием и затем растворялся в аммиаке, после чего снова осаждался магнезиальной смесью. Получившийся $Mg_2P_2O_7$ после фильтрования,

Таблица 21

Влияние дрожжевых экстрактов с разным содержанием фосфора на смертность мышей

Вводимый экстракт	Содержание фосфора (в %)	Число мышей	Погибло к 20-му дню		Продолжительность жизни отдельных мышей (в днях)
			число	%	
№ 1	2,8	12	9	75,0	4, 4, 4, 10, 10, 12, 14, 17, 19
№ 2	4,2	12	7	58,3	7, 10, 12, 12, 14, 17, 20
№ 3	5,5	12	6	50,0	8, 9, 12, 15, 16, 20
№ 4	4,3	12	7	58,3	4, 8, 9, 10, 12, 15, 17
№ 5	4,0	12	8	66,7	5, 9, 9, 11, 12, 15, 18, 18
Контроль	—	12	12	100,0	4, 6, 7, 7, 8, 8, 10, 10, 10, 12, 13, 14

Примечание. Мыши штамма «М» облучались дозой 500 r γ-лучей; экстракт вводился во всех случаях в количестве 4 мг.

промывания и прокаливания взвешивался. Данные по содержанию фосфора приведены в табл. 21 вместе с результатами опытов на мышах. Между содержанием фосфора и защитным эффектом наблюдается вполне определенная связь, еще яснее прослеживаемая на рис. 10. Данная зависимость в интервале примененных концентраций может быть описана прямой линией.

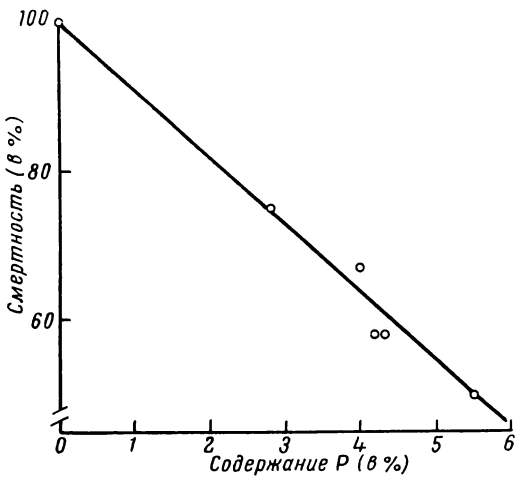


Рис. 10. Корреляция между смертностью облученных мышей и содержанием фосфора в вводимом им дрожжевом экстракте

Из этого можно сделать вывод, что защитный эффект дрожжевых экстрактов связан с водорастворимыми фосфорсодержащими макрокомпонентами, каковыми могут быть только нуклеиновые кислоты и их производные.

Описанные в настоящем разделе опыты полностью подтверждают предположение о роли нуклеиновых кислот в защитных свойствах дрожжевых экстрактов. В пользу этого говорит то, что ни одна из составных частей дрожжевых экстрактов, помимо нуклеиновых кислот, не обладает защитными свойствами. Рибонуклеиновая кислота в тех же условиях, что и дрожжевые экстракты, оказывает аналогичный эффект, причем наблю-

дается хорошее количественное соответствие. Защитное действие оказывают как нуклеиновые кислоты, выделенные из экстрактов, так и полученные препаративно. Эффективность дрожжевых экстрактов коррелирует с содержанием в них нуклеиновых кислот.

ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ

Описанные выше опыты показали, что дрожжевые экстракты при применении после облучения значительно уменьшают лучевое поражение, т. е. обладают выраженными терапевтическими свойствами. Уже один этот факт заслуживает большого внимания, так как до сих пор известно очень мало терапевтических противолучевых средств, причем эффект большинства из них непостоянен и очень специфичен. Так, препараты селезенки снижают смертность животных при введении после облучения только в том случае, если применяется строго гомопластичный и неповрежденный материал. Дрожжевые экстракты, опыты с которыми были описаны в настоящей работе, выгодно отличаются от подобных средств, так как оказывают защитное действие как на животные, так и растительные объекты.

Подробно обсуждать механизм противолучевого действия дрожжевых экстрактов было бы сейчас преждевременно. Одно из ближайших сообщений будет посвящено опытам с рибонуклеиновой кислотой, дающим дополнительный материал по данному вопросу. Пока можно с большой вероятностью утверждать, что действующим началом дрожжевых экстрактов является РНК и что в основе общего противолучевого эффекта лежит уменьшение цитологических повреждений.

С одной стороны, такие факты, как эффективность при применении после облучения и то, что существенной является нуклеопротеидная фракция, сближает дрожжевые экстракты с препаратами селезенки. С другой стороны, повышение эффективности при денатурирующих воздействиях (низкая температура, облучение) противоречат тому, что известно о противолучевом действии препаратов селезенки. Тем не менее мы полагаем, что дрожжевые экстракты и препараты селезенки принадлежат к одной и той же группе терапевтических противолучевых средств. Если это так, то представляется возможным сделать, наконец, выбор между клеточной и гуморальной теорией действия препаратов селезенки и костного мозга в пользу последней. Ведь в наших опытах эффект достигался при введении бесклеточных экстрактов из гетеропластичного материала. Мы предполагаем, что противоречивые результаты опытов по влиянию гетеропластичности и денатурации у нас и у американских авторов могут быть объяснены следующим образом. Противолучевые средства этой группы действуют через нормализацию обмена нуклеиновых кислот, нарушенного в результате облучения. Наилучший результат дает при этом гомологичная неповрежденная нуклеиновая кислота. При небольшой степени денатурации нуклеиновая кислота теряет свои специфические свойства, и организм относится к ней как к чужеродному материалу. Однако при еще большей потере специфичности вводимые извне нуклеиновые кислоты могут быть использованы как строительный материал для воссоздания нуклеиновых кислот, свойственных данному виду.

ВЫВОДЫ

1. Описываются опыты по влиянию дрожжевых экстрактов на смертность облученных мышей и на проростки гороха. Предпосылкой для этих опытов явились многочисленные данные, говорящие о связи между общим и цитологическим поражением и о значении нуклеиновых кислот в биологическом действии излучения.

2. Бесклеточные дрожжевые экстракты, будучи применены после облучения, уменьшают смертность мышей, подавление роста гороха и число ненормальных митозов в его клетках.

3. Применявшиеся экстракты нетоксичны и обладают противолучевыми свойствами в широком диапазоне дозировок. Особенно широк этот диапазон для цитологических эффектов.

4. При извлечении из экстрактов сухого вещества получается порошок, который, будучи вновь растворен, обладает всеми свойствами свежего экстракта.

5. Помещение дрожжевых клеток перед приготовлением из них экстрактов в неблагоприятные для жизнедеятельности условия (низкая температура, высушивание, облучение) сообщает им противолучевые свойства.

6. Противолучевые свойства дрожжевых экстрактов связаны с наличием в них рибонуклеиновой кислоты.

ЛИТЕРАТУРА

Кедровский Б. В. Рибонуклеиновая кислота и ее роль в развитии и функции клетки. «Успехи совр. биол.», 1951, т. 31, стр. 38.

Кедровский Б. В. Нуклеиновые кислоты в клетках поврежденного и больного организма. «Успехи совр. биол.», 1951, т. 31, стр. 309.

Куликова В. Г., Лучник Н. В., Тимофеев-Ресовский Н. В., Тимофеева-Ресовская Е. А. Лучевые поражения и воздействие на них. III. Влияние предварительного облучения, введения чужеродных сывороток и некоторых гормонов на эффект последующего облучения мышей. Тр. Ин-та биол. УФАН СССР, вып. 9. Сб. работ лаборатории биофизики № 1. Свердловск, 1957.

Лучник Н. В. Лучевые поражения и воздействие на них. II. Зависимость смертности облученных мышей и крыс от дозы облучения, пола, возраста и штамма материала и распределение этой смертности во времени. Тр. Ин-та биол. УФАН СССР, вып. 9. Сб. работ лаборатории биофизики № 1. Свердловск, 1957.

Лучник Н. В. О влиянии фракционирования и мощности дозы на цитологический эффект облучения. «Биофизика», 1956 а, т. 1, № 7.

Лучник Н. В. Цитологический анализ действия больших и малых доз ионизирующих излучений на растения. Тезисы конференции мед. радиол. Гигиеническая секция. М., Медгиз, 1956б, стр. 22.

Макаров П. М. Константность содержания дезоксирибонуклеиновой кислоты в клетке. «Успехи совр. биол.», 1956, т. 41, стр. 3.

Мейсель М. Н. Функциональная морфология дрожжевых организмов. М., Изд-во АН СССР, 1950.

Побединский М. Н. Лучевые осложнения при рентгено-радиотерапии. М., Медгиз, 1954.

Филатов В. П. Тканевое лечение (учение о биогенных стимуляторах). «Природа», 1951, т. 40, № 11 и 12.

Эльпинер И. Е. О биологическом действии ионизирующей радиации. «Успехи совр. биол.», 1952, т. 34, стр. 219.

Bacq Z. M., Herve A. Protection chimique contre le rayonnement X. Bull. Acad. Roy. Med. Belg., 1952, vol. 17 p. 13.

Bauer H. Röntgenauslösung von Chromosomenmutationen bei Drosophila melanogaster. II. Die Häufigkeit des primären Bruchereignisses nach Untersuchungen am Ring X-Chromosom. Chromosoma, 1942, Bd. 2, S. 407.

Jacobson L. O. A. humoral factor concerned in recovery from irradiation injury. Canc. Res., 1952, vol. 12, p. 315.

Lea D. E. Actions of radiations on living cell. Univ. Press, Cambridge, 1946.

Loofbourow J. R., Webb A. M. et al. Intracellular hormones. VI—VIII. Biochem. J., 1947, vol. 41, p. 114, 119, 122.

Lorenz E., Congdon C., Uphoff D Modification of acute irradiation injury in mice and guinea-pigs by bone marrow injections. «Radiology», 1952, vol. 58, p. 863.

Miller C. P., Hammond C. W., Tompkins M. Reduction of mortality from X-radiation by treatment with antibiotics. «Science», 1950, vol. III, p. 719.

Patt H. M. Protective mechanisms in ionizing radiation injury. Physiol. Rev., 1953, vol. 33, p. 35.

А К А Д Е М И Я Н А У К С С С Р
УРАЛЬСКИЙ ФИЛИАЛ

Вып. 12 ТРУДЫ ИНСТИТУТА БИОЛОГИИ 1960

Е. И. ПРЕОБРАЖЕНСКАЯ

ПРОБЛЕМА РАДИОСТИМУЛЯЦИИ РАСТЕНИЙ

III. ОПЫТЫ СО ЛЬНОМ

Настоящая работа является одной из первых в серии наших исследований, посвященных влиянию замачивания семян в слабых концентрациях раствора осколков урана на рост, развитие и урожайность различных культурных растений. Рядом опытов, проведенных в нашей лаборатории, было установлено, что слабые концентрации раствора смеси β- и γ-излучателей стимулируют рост и развитие растений, в результате чего подопытные растения превосходят контрольные по длине, числу листьев и цветков, весу органов и урожаю (Тимофеев-Ресовский, Порядкова, Макаров, Преображенская, 1957). Увеличение роста и общего веса надземной массы радиостимулированных растений навело нас на мысль о постановке опыта со льном-долгунцом — технической культурой, возделываемой на волокно.

Из литературы нам известны работы только с внешним облучением семян льна. Цурюпа [1] выяснил, что облучение льна рентгеновскими лучами вызывает ускорение первой стадии развития, после чего начинается угнетение. Густафсон [1], облучая семена льна рентгеновскими лучами, установил, что лен-долгунец и лен-кудряш являются высокорезистентными культурами: при дозе в 40 000—90 000 *r* выживает примерно половина растений.

Результаты наших опытов по облучению семян льна лучами Co^{60} также свидетельствуют о том, что лен весьма стойко переносит действие ионизирующей радиации.

Ниже описываются результаты трехлетних опытов со льном.

МАТЕРИАЛ И МЕТОДИКА

Подопытным материалом в 1951—1952 гг. служил лен-долгунец сорта «Прядильщик», в опыте 1953 г. были использованы сорта «Шатиловский» и «К-48».

Лабораторный опыт 1951 г. был поставлен в оранжерее, в ящиках с почвой. Опыт состоял из четырех вариантов в четырех повторностях. Контрольные семена льна замачивались в течение суток в водопроводной воде; в последующих трех вариантах семена льна замачивались в течение 24 часов в растворе осколков урана концентрацией: I—0,25 мкюри/л; II—

[1] Цитируется по Бреславец, 1946.

1,0 мкюри/л; III—5,0 мкюри/л. При уборке льна определялись вес и длина растений.

Полевой опыт 1951 г. состоял из трех вариантов в шести повторностях. Контрольные семена льна замачивались в течение суток в водопроводной воде; в подопытных вариантах семена льна замачивались в течение 24 часов в растворе осколков урана концентрацией: I—0,25 мкюри/л; II—1,0 мкюри/л. При уборке определялись общий вес, вес соломки и семян.

Полевой опыт 1952 г. состоял из четырех вариантов в шести повторностях. Контрольные семена высевались сухими; в трех последующих вариантах семена льна замачивались разное время в растворе осколков урана концентрацией: I—0,5 мкюри/л в течение 24 часов; II—2,0 мкюри/л в течение 6 часов; III—12,0 мкюри/л в течение часа. Таким образом, во всех вариантах данного опыта семена облучались в одинаковой дозе. При уборке урожая определялись общий вес растений, вес соломки и семян.

Полевой опыт 1953 г. состоял из трех вариантов в десяти повторностях. На контрольных делянках семена льна высевались сухими; в двух подопытных вариантах семена замачивались разное время в растворе осколков урана концентрацией: I—1,0 мкюри/л в течение 24 часов; II—24,0 мкюри/л в течение часа. Следовательно, и здесь доза облучения была одинаковой. В течение вегетации производилось измерение длины шестинедельных и спелых растений с делянок одной повторности. Делянка разделялась на восемь точек, из которых брали по 50 растений; таким образом, всего с каждой делянки было измерено 400 растений. Шестинедельные растения затем высушивали в сушильном шкафу до постоянного веса и определяли их сухой вес. При конечной уборке определялся вес растительной массы, вес семян и измерялась длина растений.

Семена во всех трех полевых опытах высевали на делянках площадью в 3 кв. м. Варианты опытов располагали в шахматном порядке. При посеве исходили из нормы высева 150 кг/га. Раствор, в котором замачивали семена, во всех опытах состоял из смеси нескольких β- и γ-излучателей обладавших достаточно жестким излучением и не слишком коротким периодом полураспада (в основном стронций-89, стронций-90, иттрий-90, цирконий-95, ниобий-95, рутений-106, цезий-137 и церий-144). Употреблялись не химически чистые, а технические препараты. Концентрации радиоактивности определялись по β-излучению в долях кюри на 1 л раствора. Для определения радиоактивности льносоломки, семян, волокна, кострики и корней бралась навеска по 0,5 или 1,0 г сухой массы, которая сжигалась в муфельной печи, а затем измерялась радиоактивность золы. Измерения производились при помощи счетной установки «Б».

Отрицательной стороной метода замачивания семян льна является то, что при этом семена сильно ослизняются, что делает совершенно невозможным их механизированный высев. На небольших делянках в 3 кв. м «мокрые» семена можно высевать вручную, разводя ослизненную массу водой. На крупных же делянках подобный метод высева обычными механизированными способами невозможен: при высушивании намоченные семена склеиваются, а механическое отделение их друг от друга ведет к повреждению части семян, в связи с чем понижается процент всхожести.

РЕЗУЛЬТАТЫ ОПЫТОВ

Ниже приводится описание результатов лабораторного и трех полевых опытов.

Лабораторный опыт. Схема настоящего опыта описана в предыдущем разделе. Визуальные наблюдения за посевами вели в течение всего вегетационного периода. При уборке льна определяли вес и длину растений. Полученные при этом данные приведены в табл. 1 и на рис. 1.

Таблица 1

Результаты уборки льна из лабораторного опыта

Вариант	Средний вес одного растения (в г)	Средняя длина одного растения (в см)	Отклонение от контроля (в %)	
			вес	длина
Контроль	0,79	76,8	—	—
0,25 мкюри/л	0,94	88,7	119	115
1,0 »	0,83	85,5	105	111
5,0 »	0,77	81,1	97	105

Из рисунка и таблицы видно, что вес и длина растений во всех вариантах, кроме веса растений в четвертом варианте (5,0 мкюри/л), превосходила контроль, причем наибольшие положительные отклонения веса и длины растений получались при замачивании семян в растворе слабой кон-

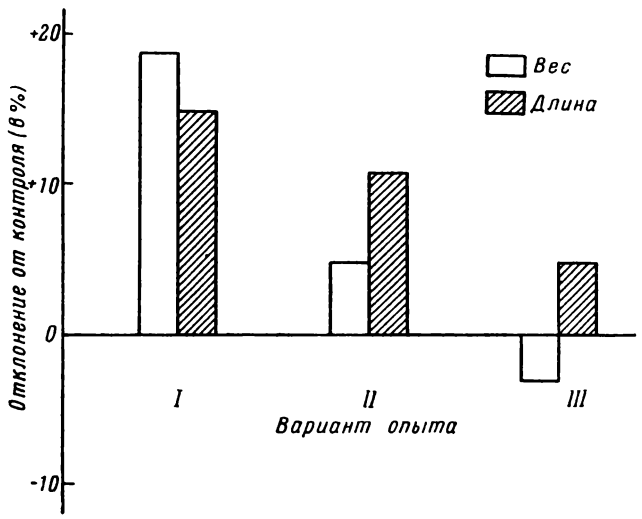


Рис. 1. Отклонение от контроля веса и длины растений льна в лабораторном опыте. Семена замачивались в растворе излучателей концентрацией: *I* — 0,25 *мкюри/л*; *II* — 1,0 *мкюри/л*; *III* — 5,0 *мкюри/л*

центрации (0,25 мкюри/л). В данном опыте, помимо повышения веса подопытных растений, намечается и некоторое увеличение их длины. Визуальные наблюдения показали, что радиостимуляция обусловила более раннюю и дружную всхожесть семян, в результате чего опытные растения на первых стадиях развития выглядели значительно лучше и зацвели на несколько дней раньше контрольных. Однако к моменту созревания разница между контрольными и стимулированными растениями становилась менее заметна.

Полевые опыты. Полевые опыты проводились в течение трех лет. Опыт 1951 г. был поставлен в трех вариантах при шести повторностях. При уборке урожая растения взвешивались целиком и по частям. В табл. 2 приведены средние данные на одну делянку по общему весу, весу соломки и весу семян. На рис. 2 графически изображены отклонения исследуемых признаков подопытных растений от контроля.

Таблица 2

Результаты уборки льна из полевого опыта 1951 г.
(средние данные на делянку)

Вариант опыта	Вес (в г)			Вес (в % от контроля)		
	общий	соломки	семян	общий	соломки	семян
Контроль	812,4	714,2	98,2	—	—	—
0,25 мкюри/л	970,5	850,8	119,7	119	119	122
1,0 »	895,8	791,3	104,5	110	111	106

Из таблицы и рисунка видно, что все признаки растений в обоих вариантах дали положительные отклонения от контроля. Некоторое повышение урожая надземной массы подопытных растений по сравнению с контролем даст несомненно и прирост льна-волокна. Наилучшие результаты получились при замачивании семян в растворе слабой концентрации (0,25 мкюри/л). В течение всего вегетационного периода велись визуальные наблюдения, показавшие, как и в лабораторном опыте, что стимулированные растения развиваются лучше контрольных, причем разница эта наиболее ярко выражена на первых стадиях развития растений.

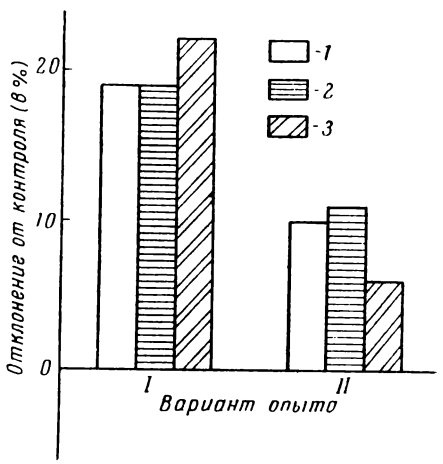


Рис. 2. Отклонение от контроля общего веса (*1*), веса соломки (*2*) и веса семян (*3*) льна в полевом опыте 1951 г. Семена замачивались в растворе излучателей концентрацией: *I* — 0,25 *мкюри/л*; *II* — 1,0 *мкюри/л*

Опыт 1952 г. состоял из четырех вариантов в шести повторностях. Во всех вариантах данного опыта за счет варьирования времени замачивания и концентраций раствора семена получили одинаковую дозу облучения. При уборке определялся общий вес растений, вес соломки и семян. Все эти данные приведены в табл. 3.

На рис. 3 графически изображены процентные отклонения всех признаков подопытных растений от контроля. Из таблицы и рисунка видно, что общий вес стимулированных растений, вес их соломки и семян во всех вариантах превышает контроль. Таким образом, приведенные данные указывают на то, что под влиянием замачивания семян льна в растворе излучателей увеличивается общий вес растений, масса льносоломки и вес семян. При длительном замачива-

Таблица 3

Результаты уборки льна из полевого опыта 1952 г.
(средние данные на делянку)

Вариант опыта	Вес (в г)			Вес (в % от контроля)		
	общий	соломки	семян	общий	соломки	семян
Контроль	908,4	710,3	198,1	—	—	—
0,5 мкюри/л . .	1148,9	889,8	259,1	126	125	131
2,0 » . .	1022,0	798,0	224,0	113	112	113
12,0 » . .	1014,6	791,5	223,1	112	111	113

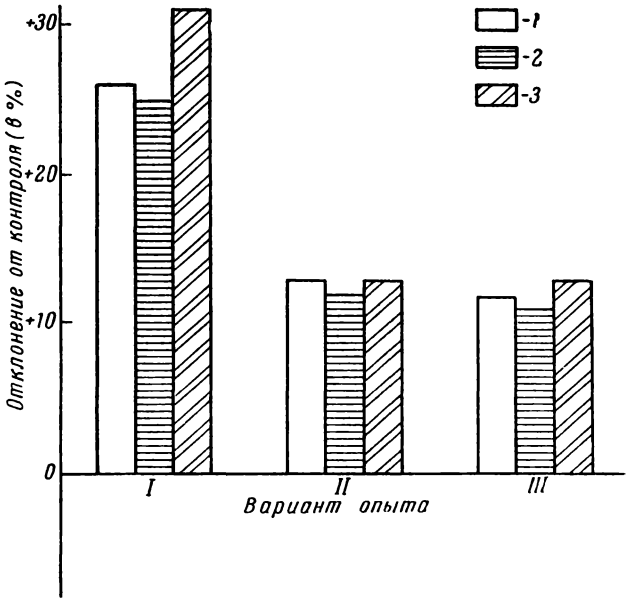


Рис. 3. Отклонение от контроля общего веса (*1*), веса соломки (*2*) и веса семян (*3*) в полевом опыте 1952 г. Семена замачивались в растворе излучателей концентрацией: *I* —0,5 *мкюри/л* в течение 24 часов; *II* — 2,0 *мкюри/л* в течение 6 часов; *III* — 12,0 *мкюри/л* в течение часа

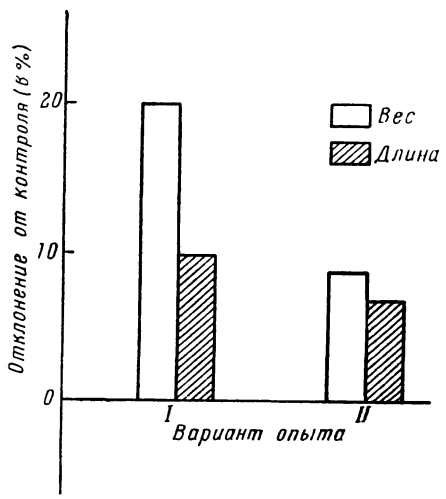


Рис. 4. Отклонение от контроля сухого веса и длины 6-недельных растений льна в полевом опыте 1953 г. Семена замачивались в растворе излучателей концентрацией: *I* — 1,0 *мкюри/л* в течение 24 часов; *II* — 24,0 *мкюри/л* в течение часа

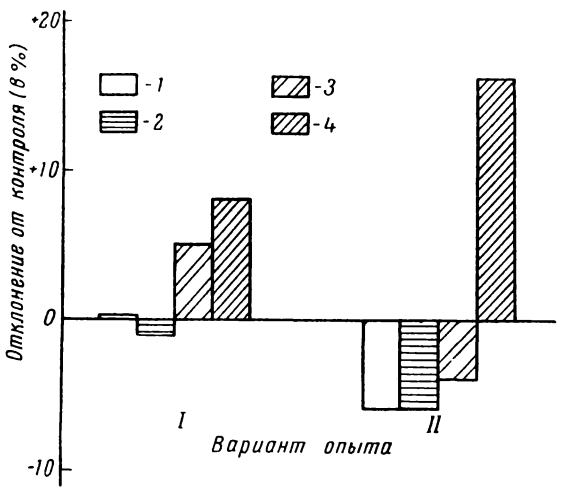


Рис. 5. Отклонение от контроля ряда признаков у растений льна из урожая полевого опыта 1953 г. Семена замачивались в растворе излучателей концентрацией: *I* — 1,0 *мкюри/л* в течение 24 часов; *II* — 24,0 *мкюри/л* в течение часа

1 — общий вес; *2* — вес соломки; *3* — вес семян; *4* —длина растений

нии семян в растворе слабой концентрации (0,5 мкюри/л) получены наилучшие результаты как по общему весу (+25%), так и по весу льносоломки (+25%) и зерна (+31%).

В 1953 г. опыт был поставлен в трех вариантах при десяти повторностях. В табл. 4 приведены средняя длина стеблей шестинедельных растений и их средний вес в сухом виде, а также процентное отклонение этих показателей от контроля.

Таблица 4

Результаты уборки шестинедельных растений льна из опыта 1953 г.

Вариант опыта	Число растений	Средний сухой вес одного растения (в г)	Средняя длина одного растения (в см)	Отклонение от контроля (в %)	
				вес	длина
Контроль	400	0,117	37,3	—	—
1,0 мкюри/л . .	400	0,140	41,2	120	110
24,0 » . .	400	0,127	40,1	109	107

Таблица 5

Данные, полученные при уборке урожая льна в среднем на одну делянку (из полевого опыта 1953 г.)

Вариант опыта	Вес (в г)			Вес (в % от контроля)		
	общий	соломки	семян	общий	соломки	семян
Контроль	1470,4	1213,8	256,6	—	—	—
1,0 мкюри/л . .	1470,4	1200,8	269,6	100	99	105
24,0 » . .	1383,8	1138,0	245,8	94	94	96

На рис. 4 графически изображены процентные отклонения этих признаков подопытных растений от контроля. Из таблицы и рисунка видно, что и по длине стеблей и по весу подопытные растения превышают контрольные, причем при замачивании семян в растворе слабой концентрации (1,0 мкюри/л) положительный эффект наиболее выражен. Следовательно, замачивание семян льна в растворе излучателей в той или иной мере ускоряет рост растений.

При уборке урожая льна определялся общий вес растительной массы, вес соломки, семян, а также измерялась длина растений. В табл. 5 приведены данные по весовым признакам в среднем на одну делянку и в процентах от контроля. В табл. 6 приведена средняя длина зрелых растений в сантиметрах и процентах от контроля.

На рис. 5 графически изображены процентные отклонения от контроля всех признаков подопытных растений при конечной уборке. Из приведенных данных видно, что по общему весу растительной массы, весу соломки и семян подопытные растения дают незначительные отрицательные или положительные отклонения от контроля; по длине стеблей подопытные растения обоих вариантов превышают контрольные. Таким образом, слабо положительный эффект оказывает замачивание семян в растворе излучателей концентрацией 1,0 мкюри/л. При использовании более концентрированного раствора (24,0 мкюри/л) хотя и отмечается стимуляция роста, т. е. подопытные растения по длине стеблей превышают контрольные, но конечный урожай вегетативной массы и семян, наоборот, несколько мень-

Таблица 6

Средняя длина спелых растений льна из опыта 1953 г.

Вариант опыта	Число растений	Средняя длина растения	
		в см	в % от контроля
Контроль	400	48,0	—
1,0 мкюри/л . .	400	51,6	108
24,0 » . .	400	55,5	116

ше, чем в контроле. Объясняется это, по-видимому, тем, что подопытные растения быстрее растут, вытягиваются, причем стебли их становятся тоньше, а следовательно и легче по сравнению с контролем.

Содержание радиоактивности в органах растений

В полевом опыте 1952 г. содержание радиоактивности определялось в корнях, верхних, средних и нижних частях стебля, волокне, кострике и семенах. В табл. 7 приведены результаты измерения радиоактивности в различных частях и органах растений льна из опыта 1952 г.

Таблица 7

Радиоактивность (в имп/мин на 1 г сухого вещества) различных частей и органов растений льна из опыта 1952 г.

Вариант опыта	Корни	Стебли			Волокно	Кострика	Семена
		верхняя часть	средняя часть	нижняя часть			
0,5 мкюри/л . .	30	118	8	26	24	26	2
2,0 » . .	51	116	18	26	58	50	2
12,0 » . .	124	112	86	66	54	50	7

Из таблицы видно, что наименьшая концентрация радиоактивности обнаруживается в семенах, а наибольшая — в верхних частях стебля и корнях. В остальных органах и частях растений радиоактивность распределяется во всех вариантах почти равномерно. Радиоактивность семян крайне низка и лежит в пределах толерантных норм. Радиоактивность льноволокна примерно раз в пять-шесть выше радиоактивности семян. Необходимо указать на то, что с повышением концентрации раствора и соответствующим уменьшением срока замачивания семян отмечается некоторое повышение содержания радиоактивности во всех органах растения.

В опыте 1953 г. радиоактивность измерялась в стеблях, волокне и семенах. Результаты измерений приведены в табл. 8.

Таблица 8

Радиоактивность (в имп/мин на 1 г сухого вещества) различных органов растений льна из опыта 1953 г.

Вариант опыта	Стебли	Волокно	Семена
1,0 мкюри/л	36	32	2
24,0 »	240	104	16

Радиоактивность определялась в имп/мин на 1 г сухого вещества с вычетом радиоактивности, найденной в контрольных растениях. Из таблицы видно, что наибольшее содержание радиоактивности отмечается во всех органах растений, развивавшихся из семян, которые замачивались в более концентрированном растворе осколков урана в течение короткого времени.

Характер распределения радиоактивности по органам растения следующий: наименьшая концентрация радиоактивности отмечается в семенах и наибольшая в корнях.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

На основании в принципе сходных результатов трехлетних опытов можно прийти к следующему заключению. Под влиянием замачивания семян в растворе излучателей увеличивается длина растений, вес соломки и семян. Только при замачивании семян в растворе наиболее сильной концентрации (24,0 мкюри/л) общий вес растительной массы, вес соломки и семян несколько меньше, чем в контроле. Эффект радиостимуляции зависит от концентрации раствора излучателей и срока замачивания семян. В наших опытах наилучшие результаты были получены при длительном замачивании семян (24 часа) в растворах слабой концентрации (0,25—1,0 мкюри/л).

Измерения радиоактивности, содержащейся в отдельных органах и частях растений льна, показали, что радиоактивность семян лежит в пределах толерантности и колеблется в пределах 10^{-8}—10^{-10} кюри на 1 кг. Радиоактивность волокна несколько выше. Больше всего радиоактивности в верхней части стебля и корнях. Данные, приведенные в табл. 7 и 8, показывают, что с повышением концентрации раствора излучателей даже при одновременном сокращении срока замачивания семян поступление радиоактивности в растение увеличивается. Следовательно, более длительное замачивание в растворах слабых концентраций имеет ряд преимуществ перед краткосрочным замачиванием семян в концентрированных растворах, несмотря на то, что семена получают в том и другом случае одинаковую дозу излучения. Во-первых, положительное воздействие на рост, развитие и конечный урожай проявляется резче всего при длительном замачивании в слабых растворах. Во-вторых, в органах растений, семена которых замачивались в слабых растворах излучателей, несмотря на более длительное время замачивания, содержится меньше радиоактивности. Семена, замачивавшиеся в концентрированных растворах излучателей короткое время, имеют бо́льшую исходную радиоактивность, вероятно, за счет поверхностной адсорбции, которая в первые часы замачивания значительно преобладает над поступлением радиоактивности внутрь семени. Наконец, в-третьих, замачивание семян в слабых растворах менее опасно из чисто практических соображений, если этот метод применять в более широких масштабах.

Полученные результаты следует считать предварительными, ибо проведенные опыты по масштабу невелики. Эти результаты необходимо проверить в полевых опытах большего масштаба. Однако для осуществления таких исследований важно разрешить серьезное затруднение, связанное с высевом замоченных семян льна механизированным способом, так как семена льна при замачивании сильно ослизняются. В связи с этим интересно провести опыты по облучению сухих семян извне, а также разработать метод механизированного сева намоченных семян.

ВЫВОДЫ

1. Описываются трехлетние опыты (один лабораторный и три полевых) по изучению влияния замачивания семян в слабых растворах осколков урана на рост, развитие и конечный урожай растений льна.

2. Семена льна замачивались в растворах различных концентраций осколков урана: 0,25; 0,5; 1,0; 2,0; 5,0; 12,0; 24,0 мкюри/л. В лабораторном и полевом опытах 1951 г. семена всех вариантов замачивались в течение 24 часов. В полевых опытах 1952—1953 гг. сроки замачивания варьировались в зависимости от концентрации раствора так, что семена во всех вариантах получали за время замачивания одинаковую дозу излучения. При уборке измерялась длина растений и определялся вес вегетативной массы и вес семян. Кроме того, определялась радиоактивность отдельных органов и частей растений.

3. Результаты опытов показали, что замачивание семян в растворе излучателей оказывает благоприятное влияние на рост, развитие и урожайность растений льна, т. е. стимулирует увеличение длины растений, веса соломки и семян. Опыты показали, что наиболее выраженный положительный эффект получается при продолжительном (24 часа) замачивании семян в слабых растворах излучателей (0,25—0,5 мкюри/л).

4. Измерение радиоактивности в органах и частях растений показало, что менее всего радиоактивности в семенах и более всего в верхней части стебля и корнях. Радиоактивность семян колеблется в пределах 10^{-8}—10^{-10} кюри на 1 кг. Несколько выше радиоактивность волокна. Содержание радиоактивности в органах растений зависит от концентрации раствора и срока замачивания: при краткосрочном замачивании семян в концентрированных растворах излучателей поступление в них радиоактивности несколько увеличивается.

5. Длительное замачивание семян в растворах излучателей слабой концентрации дало наилучшие результаты как по стимуляции роста и развития растений, так и по содержанию радиоактивности в их органах.

ЛИТЕРАТУРА

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

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

А К А Д Е М И Я Н А У К С С С Р
У Р А Л Ь С К И Й Ф И Л И А Л

Вып. 12 ТРУДЫ ИНСТИТУТА БИОЛОГИИ 1960

Н. А. ПОРЯДКОВА

ПРОБЛЕМА РАДИОСТИМУЛЯЦИИ РАСТЕНИЙ

IV. ОПЫТЫ С САХАРНОЙ СВЕКЛОЙ

ВВЕДЕНИЕ

В первом сообщении этой серии был дан общий итог работы нашей лаборатории в течение нескольких лет по радиостимуляции растений и теоретическая интерпретация полученных результатов (Тимофеев-Ресовский, Порядкова, Макаров и Преображенская, 1957). Данные по отдельным опытам были описаны весьма кратко, без приведения всех полученных результатов.

В настоящем сообщении будут приведены подробные данные, полученные в лабораторных и полевых опытах с сахарной свеклой при предпосевном замачивании семян в слабых растворах смеси осколков урана и при облучении их извне γ-лучами Co^{60}.

Так как плодоношение сахарной свеклы происходит лишь на второй год вегетации, разводить свеклу на семена приходится на семенных участках отдельно от производственных посевов. В этих условиях получение семенного материала становится заметным накладным расходом, а повышение качества и всхожести семян приобретает особую важность, что дает возможность значительно снизить нормы высева. Как известно, семена сахарной свеклы представляют собой сростки плодов, покрытые довольно толстой деревянистой оболочкой; поэтому для ускорения набухания и увеличения всхожести семян перед посевом их намачивают сравнительно большими количествами воды (120—160% от веса семян). Тем не менее обычная в практике всхожесть семенного материала сравнительно с другими культурами невысока.

Исходя из этого, мы применили с целью повышения всхожести семян сахарной свеклы и увеличения ее урожайности метод стимуляции, испытанный уже ранее на других сельскохозяйственных культурах и заключающийся в замачивании семян в слабо концентрированных растворах β-излучателей или их облучении малыми дозами рентгеновских или γ-лучей.

МАТЕРИАЛ И МЕТОДИКА

Опыты с сахарной свеклой проводились в течение двух лет. В первый год для посева были взяты семена сорта «Р-632». Опыт состоял из трех вариантов: в контроле семена замачивались в течение двух суток в водопроводной воде, в первом опытном варианте — в течение того же времени

в растворе неразделенной смеси осколков урана (состоявшей в основном из Sr^{90}, Y^{90}, Zr^{95}, Nb^{95}, Ru^{106}, Rh^{106}, Cs^{137}, Ce^{144}, Pr^{144}, Pm^{147}) концентрацией 1 мкюри/л; во втором опытном варианте семена подвергались в течение вторых суток замачивания в воде γ-облучению дозой в 250 *r*. Для каждого варианта перед замачиванием брали 192 г семян (из расчета 24 кг на 1 га), которые после окончания обработки развешивались на восемь равных частей (по числу повторностей) и высевались на делянки площадью 10 кв. м каждая. Растения убирались в пятинедельном возрасте до их созревания.

Во второй год опыт с сахарной свеклой (сорт «У-752») состоял только из двух вариантов, соответствующих контролю и первому варианту предыдущего опыта. Замоченные семена развешивались на пять частей по числу повторностей и высевались на делянках площадью 15 кв. м каждая; варианты размещались в шахматном порядке. В течение вегетационного периода производили прорывку, несколько прополок и три рыхления междурядий. Выдернутые при прорывке с каждой делянки растения подсчитывали отдельно и немедленно взвешивали. Число растений на каждой делянке после прорывки оставалось примерно одинаковым; расстояние между растениями в рядке — 20 см. Учет растений при прорывке дал возможность определить всхожесть и до некоторой степени развитие растений. Уборку во втором опыте производили в начале октября; учитывали число растений на делянке, вес корнеплодов и вес ботвы. Из контрольных и стимулированных растений изготовляли пробы для измерения в них радиоактивности; при этом растения разделяли на листья и корнеплоды, а последние в свою очередь — на кожуру и мякоть (корнеплод с удаленной кожурой), высушивали при 100—105° С до постоянного веса и тщательно перемешивали. По 1 г сухого вещества этих частей растений озоляли; радиоактивность золы контрольных и стимулированных растений измерялась при помощи установки «Б».

Помимо этого, в корнеплодах контрольных и стимулированных растений определяли с помощью кругового поляриметра процентное содержание сахара. Для этого было взято с контрольных и опытных делянок несколько одинаковых по весу и форме корнеплодов; после тщательного отмывания от почвы корнеплоды пропускали через мясорубку; полученную мезгу хорошо перемешивали и брали из нее в каждом случае несколько параллельных навесок для определения сахара.

РЕЗУЛЬТАТЫ ОПЫТОВ

Опыт первого года состоял из контроля, замачивания семян в растворе излучателей и облучения их извне γ-лучами. При замачивании семена в течение двух суток получали дозу облучения в 40—50 *r*; кроме того, за счет абсорбции излучателей в семенах образуется небольшое депо радиоактивности, в результате чего в течение всего вегетационного периода растения подвергаются чрезвычайно слабому облучению. Во втором варианте опыта семена однократно облучались извне γ-лучами в дозе 250 *r* (растения же, выросшие из них, на протяжении вегетирования не облучаются).

В этом опыте растения были убраны в пятинедельном возрасте. При уборке учитывались число растений с каждой делянки и их вес. Результаты уборки по повторностям приведены в табл. 1; внизу помещены усредненные данные из всех повторностей по числу растений, общему весу и среднему весу одного растения.

На рис. 1 в верхней его части графически изображены процентные отклонения от контроля основных признаков растений. Из таблицы и рисунка видно, что замачивание семян сахарной свеклы в растворе смеси β-излучателей значительно увеличивает число растений на делянку, т. е. заметно повышает всхожесть. Незначительное превышение контроля по среднему

Таблица 1

Результаты уборки пятинедельных растений сахарной свеклы (в скобках — % контроля)

Повторности	Контроль			Замачивание в растворе излучателей (1 мкюри/л)			Облучение дозой 250 *r*		
	число растений	общий вес (в г)	средний вес 1 растения (в г)	число растений	общий вес (в г)	средний вес 1 растения (в г)	число растений	общий вес (в г)	средний вес 1 растения (в г)
1	2120	6620	3,12	2435	8620	3,55	1960	5795	2,95
	—	—	—	(115)	(130)	(114)	(93)	(88)	(95)
2	1562	6410	4,10	2450	8891	3,62	2060	7455	3,62
	—	—	—	(156)	(138)	(88)	(132)	(116)	(91)
3	1840	8220	4,46	1970	9780	4,96	1420	8700	6,12
	—	—	—	(107)	(119)	(111)	(77)	(106)	(137)
4	1830	8995	4,91	2160	9900	4,58	1450	9580	6,60
	—	—	—	(118)	(110)	(93)	(79)	(107)	(135)
5	1800	6170	3,42	2500	11590	4,64	2180	6980	3,20
	—	—	—	(139)	(188)	(136)	(121)	(113)	(94)
6	1400	7745	5,53	2330	13430	5,76	2300	12230	5,30
	—	—	—	(166)	(173)	(104)	(164)	(158)	(96)
7	1980	10470	5,28	2700	13960	5,18	2200	12420	5,63
	—	—	—	(136)	(134)	(98)	(111)	(108)	(107)
8	1370	11230	8,19	1900	14750	7,78	1460	11650	7,97
	—	—	—	(139)	(131)	(95)	(107)	(104)	(98)
Средние данные	1737	8232	4,70	2306	11365	4,93	1879	9351	4,97
	—	—	—	(133)	(138)	(105)	(108)	(113)	(106)

весу одного растения оказалось нереальным, общий же вес растений повышен за счет увеличения числа растений на делянку. При облучении семян извне получены весьма изменчивые данные по всем изученным признакам. Усреднение по повторностям дает некоторое превышение контроля по числу растений и общему весу, но это превышение при математической обработке полученных данных из-за слишком большой изменчивости результатов оказалось нереальным. В табл. 2 приведены результаты статистического анализа данных, полученных при уборке, которые показали высокую достоверность повышения числа растений и их общего веса только при замачивании семян перед посевом в растворе смеси осколков урана.

Таблица 2

Статистический анализ данных, полученных при уборке растений сахарной свеклы в возрасте 5 недель

Вариант опыта	Признаки	Разница с ошибкой	*t*	*n*	*P*
Замачивание в растворе осколков урана (1 мкюри/л)	Число растений	568±101	5,62	7	0,0008
	Общий вес растений	3133±502	6,24	7	0,00045
	Средний вес 1 растения	0,130±0,172	0,76	7	0,47
Облучение дозой 250 *r*	Число растений	141±127	1,11	7	0,30
	Общий вес растений	1075±490	2,20	7	0,065
	Средний вес 1 растения	0,30±0,26	1,15	7	0,29

На следующий год нами было поставлено два опыта: один — лабораторный, по определению процента прорастания семян в чашках Петри, другой — полевой, по стимуляции урожая. В обоих опытах семена замачивались в воде (контроль) или в растворе осколков урана концентрацией 1 мкюри/л. В лабораторном опыте прорастание измерялось процентом проросших «клубочков»; окончательный результат устанавливался спустя

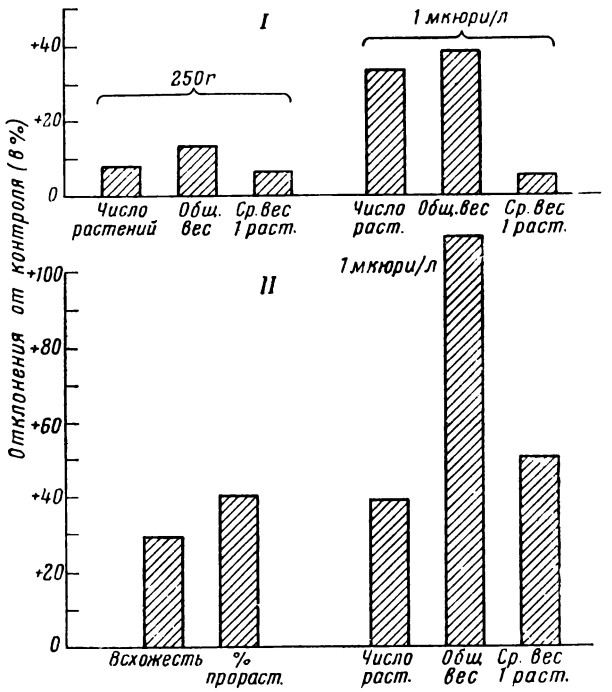


Рис. 1. Влияние предпосевного замачивания семян сахарной свеклы в растворе осколков урана концентрацией 1 *мкюри/л* и облучения их извне γ-лучами на всхожесть и урожай 5-недельных растений. *I* — опыт первого сезона; *II* — опыт второго сезона

10 дней после начала проращивания. Полученные в опыте результаты приведены в табл. 3, из которой видно, что контрольные семена дали около 37%, а «стимулированные» — около 52% проросших «клубочков». Таким образом, всхожесть стимулированных семян оказалась примерно на 40% выше контрольных.

Таблица 3

Прорастание семян сахарной свеклы, замачивавшихся в воде или в растворе осколков урана

Вариант опыта	Общее число семян	Число проросших семян	Прорастание	
			в %	в % контроля
Контроль	969	360	37	100
1 мкюри/л	684	359	52	141

Полевой опыт проводился в пяти повторностях на делянках площадью 15 кв. м. С момента посева на этих делянках велись регулярные визуальные наблюдения, причем отмечалось появление первых всходов, массовых

всходов, а также определялась густота стояния растений. Было установлено, что на опытных делянках как единичные, так и массовые всходы появлялись на сутки раньше, чем на контрольных. Визуальные наблюдения в течение первого месяца вегетации создавали впечатление большей густоты стояния и несколько более сильного развития стимулированных растений по сравнению с контролем. Прорывка растений была произведена в пятинедельном возрасте, причем на каждой делянке было оставлено примерно одинаковое число растений. При прорывке учитывали число и общий вес удаленных растений. Полученные данные приведены в табл. 4, а их статистический анализ, показавший полную достоверность повышения числа растений, их общего веса и среднего веса одного растения,— в табл. 5.

Таблица 4

Влияние замачивания семян сахарной свеклы в растворе осколков урана на всхожесть и урожай пятинедельных растений (в скобках — % контроля)

Повторности	Контроль			Концентрации 1 мкюри/л		
	число растений	общий вес (в г)	средний вес 1 растения (в г)	число растений	общий вес (в г)	средний вес 1 растения (в г)
1	243	557	2,29	374	1175	3,15
				(154)	(211)	(138)
2	214	724	3,38	326	1285	3,94
				(152)	(178)	(117)
3	325	1050	3,23	373	2542	6,81
				(115)	(242)	(211)
4	276	1078	3,90	346	1687	4,88
				(129)	(157)	(125)
5	302	1506	4,99	475	3578	7,53
				(157)	(236)	(151)
Средние данные	272	983	3,61	379	2053	5,42
				(139)	(209)	(150)
Всхожесть	1864			2398		
				(129)		

Таблица 5

Статистический анализ данных, полученных при прорывке растений сахарной свеклы в опыте второго года (семена замачивались в растворе осколков урана концентрацией 1 мкюри/л)

Признаки	Разница с ошибкой	t	n	P
Число растений	107 ± 22	4,86	4	0,008
Общий вес растений	1070 ± 304	3,52	4	0,026
Вес 1 растения	$1,69 \pm 0,23$	7,34	4	0,0019

Из этих таблиц видно, что результаты прорывки подтверждают визуальные наблюдения. Чтобы определить разницу в проценте всхожести стимулированных и контрольных семян, к числу удаленных растений было прибавлено число растений, оставленных на делянке; повышение всхоже-

сти на 29% в полевых условиях хорошо соответствует данным, полученным в лабораторном опыте по проращиванию семян сахарной свеклы в чашках Петри.

В нижней части рис. 1 графически изображены отклонения от контроля для всхожести (вычисленные при прорывке растений с делянок), для прорастания (полученного в вышеописанном опыте по проращиванию семян в чашках Петри), для числа растений, общего веса и среднего веса одного растения при прорывке свеклы.

При уборке, произведенной в начале октября, учитывалось число растений с каждой делянки, вес корнеплодов и вес ботвы. Полученные при этом данные приведены в табл. 6, а статистическая обработка их в табл. 7.

Таблица 6

Результаты уборки урожая сахарной свеклы из опыта по замачиванию семян перед посевом в растворе осколков урана

Повторности	Варианты опыта	Число растений	Вес ботвы		Вес корнеплодов		Вес ботвы	
			в кг	в % контроля	в кг	в % контроля	в % от общего веса	в % контроля
1	Контроль	90	21,6		33,4		39,3	
	1 мкюри/л	101	28,4	131	41,9	125	40,4	102,5
2	Контроль	106	26,5		33,6		44,0	
	1 мкюри/л	100	32,6	123	38,9	116	45,5	103,0
3	Контроль	98	21,6		28,6		43,1	
	1 мкюри/л	102	30,0	139	45,6	159	39,8	92,5
4	Контроль	112	25,6		25,6		50,0	
	1 мкюри/л	104	33,1	129	36,9	144	47,3	95,0
В среднем на делянку	Контроль	—	23,82		30,30		44,0	
	1 мкюри/л	—	31,27	130	40,82	135	43,3	98,4
В среднем на 1 растение	Контроль	—	0,23	—	0,30	—	—	—
	1 мкюри/л	—	0,30	130	0,40	133	—	—

Примечание. При конечной уборке учитывалось только четыре повторности так как пятая за месяц до уборки была потравлена.

Таблица 7

Статистический анализ данных, полученных при конечной уборке сахарной свеклы в опыте второго года (семена замачивались в растворе осколков урана концентрацией 1 мкюри/л)

Признаки	Разница с ошибкой	t	n	P
Вес ботвы	7,2±0,49	14,7	3	0,0007
Вес корнеплодов	11,15±2,53	4,54	3	0,02

Рассмотрение этих таблиц показывает, что замачивание семян сахарной свеклы в растворе осколков урана довольно значительно и статистически достоверно повышает как вес корнеплодов, так и вес ботвы. Из таблицы видно, что вес корнеплодов стимулировался в несколько большей степени, чем вес ботвы. Это становится особенно ясным, если (как это принято в отношении сахарной свеклы) вычислить вес ботвы в процентах от общего веса растений: эти величины почти одинаковы у контрольных и стимулированных растений, будучи у последних даже немного ниже.

Возможно, что это объясняется несколько ускоренным созреванием растений, т. е. более ранним и быстрым оттоком питательных веществ из листьев в корнеплоды. На рис. 2 графически изображены процентные отклонения от контроля для четырех основных признаков урожая в пересчете на одно растение. Для суждения об общем уровне урожая можно произвести пересчет на гектар, что дает в контроле около 200 ц/га, а для стимулированных растений около 270 ц/га. Такой урожай для данной местности (Южный Урал) можно считать очень хорошим, тем более что из-за позднего посева весь период вегетации подопытных растений продолжался лишь 127 дней.

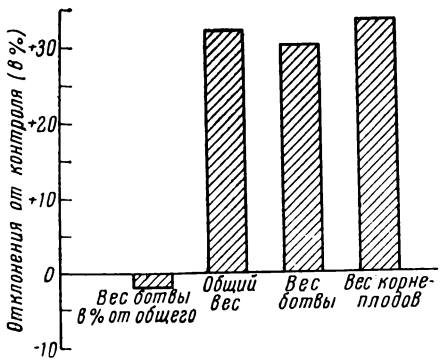


Рис. 2. Влияние предпосевного замачивания семян сахарной свеклы в растворе осколков урана с концентрацией 1 *мкюри/л* на урожай

Сразу же после уборки урожая в контрольных и стимулированных корнеплодах из нескольких повторностей поляриметрическим методом определялось процентное содержание сахара; такие же определения были повторены еще два раза с промежутками в четыре дня. Полученные результаты приведены в табл. 8; усредненные цифры дают для контроля 20,56% сахара, а для стимулированных корнеплодов 20,76%, т. е. реальная разница в содержании сахара у обоих вариантов отсутствует.

Необходимо отметить здесь следующее любопытное явление, неизменно наблюдавшееся при приготовлении мезги для определения процентного

Таблица 8

Содержание сахара в контрольных и стимулированных корнеплодах

Дата	Содержание сахара (в %)	
	контроль	опыт
4/X	21,1	21,8
4/X	21,2	21,8
7/X	20,4	20,9
7/X	20,2	20,9
7/X	20,2	20,9
11/X	20,6	19,9
11/X	20,6	19,6
11/X	20,2	20,3
В среднем	20,56	20,76

содержания сахара. Как известно, на воздухе мезга очень быстро темнеет. Мы заметили, что мезга из стимулированных корнеплодов уже через 15—20 мин. становилась значительно темнее контрольной, приобретая почти черный цвет, причем эта разница не исчезала и при длительном хранении мезги. Причины такого явления нами еще не проанализированы; одним из возможных объяснений является предположение о некотором различии в содержании либо окислительных ферментов, либо диоксифенилала-

нина, образующего при окислении темный пигмент, который образуется и in vitro при облучении фенольных соединений (Loiseleur et Sauvage, 1953).

В опыте второго года измерялась радиоактивность листьев, кожуры и мякоти корнеплодов контрольных и стимулированных растений; с этой целью из средних проб абсолютно сухого вещества (высушены до постоянного веса при 100—105° С) этих частей растений брались для сжигания навески по 1 г. Результаты измерения радиоактивности приведены в табл. 9, в частицах в минуту на 1 г абсолютно сухого вещества и в пересчете на 1 кг сырого веса ботвы и корнеплодов; радиоактивность выражена в кюри на килограмм.

Таблица 9

Результаты измерения радиоактивности в разных частях контрольных и стимулированных растений сахарной свеклы

Части растения	Частиц в минуту на 1 г сухого вещества			На 1 кг сырого вещества стимулированных растений	
	контроль	стимуляция	разница	частиц в мин.	кюри
Ботва	14	14	—	—	—
Корнеплод . .	8	11	3	6 000	$3 \cdot 10^{-9}$
Кожура . . .	13	18	5	10 000	$5 \cdot 10^{-9}$
Мякоть	5	8	3	6 000	$3 \cdot 10^{-9}$
Сахар	4	2	—	—	—

Кроме того, из мезги был извлечен, так же как и при определении процентного содержания, сахар для измерения в нем радиоактивности; при помощи наших счетных установок «Б» активность в сахаре не была обнаружена. Из таблицы видно, что по содержанию радиоактивности листья стимулированных растений практически не отличаются от контрольных, т. е. активность продукта ничтожна и находится в пределах толерантности. Радиоактивность, обнаруженная в контрольных препаратах, по-видимому, объясняется сравнительно высоким содержанием калия в свекле.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В опытах с сахарной свеклой были получены следующие результаты.

В опытах первого года замачивание семян в течение двух суток в растворе осколков урана концентрацией 1 мкюри/л обусловило вполне реальное повышение числа взошедших растений (на 33%) и их общего веса (на 38%). Наблюдающийся эффект несомненно связан с действием излучений и не может быть объяснен действием невесомых количеств микроэлементов. Нами ставились специальные опыты (Тимофеев-Ресовский, Порядкова, Макаров, Преображенская, 1957) по замачиванию семян в смеси стабильных изотопов тех же элементов в соответствующих концентрациях, показавшие, что в этих условиях никакой стимуляции не происходит. Облучение семян извне γ-лучами (Co^{60}) в дозе 250 *r* не дало реальной разницы ни по числу взошедших растений, ни по их весу. Отсутствие эффекта при облучении извне может быть объяснено тем, что неправильно была выбрана доза облучения. Как показано нами в опытах с другими видами культурных растений (горох, пшеница), стимуляционный

эффект от γ-облучения несомненно существует [1]. Аналогичные результаты были получены также в многочисленных опытах, поставленных в лаборатории Л. П. Бреславец (Бреславец, 1946; Бреславец, Милешко, Языкова, 1955; Атабекова, 1938). Вышесказанное заставляет думать, что и для сахарной свеклы может быть найдена стимулирующая доза γ-лучей.

Наблюдавшееся в этом опыте отсутствие увеличения среднего веса одного растения при замачивании семян в растворе излучателей может объясняться следующей причиной. При довольно высоком проценте всхожести семян, взятых для опыта, была выбрана несколько завышенная норма высева, вследствие чего густота стояния растений в пятинедельном возрасте составляла около 100 растений на погонный метр рядка (в опыте следующего года таковая была примерно в пять раз меньше). Естественно, что при слишком большой густоте стояния, сильно ограничивавшей рост растений и перекрывавшей тем самым стимулирующее действие излучений, не могло быть различий в среднем весе одного растения в разных вариантах опыта.

Во второй год замачивание семян в растворе излучателей дало более выраженный эффект. В лабораторном опыте по определению прорастания семян превышение контроля составило 40%, а в полевом опыте число взошедших растений на опытных делянках превысило контроль на 29%. Учет числа и веса растений, удаленных с делянок при прорывке, показал, что стимуляция роста проявляется уже на ранних стадиях развития и заключается в увеличении среднего веса одного стимулированного растения на 50% по сравнению с контролем. Разница в развитии растений сохраняется в течение всего вегетационного периода, поскольку и при конечной уборке общий вес стимулированных корнеплодов оказался на 35%, а средний вес одного корнеплода на 33% больше, чем в контроле. При повышении урожая свеклы при помощи удобрений увеличение веса корнеплодов обычно сопровождается некоторым понижением процентного содержания сахара в них; в наших опытах (так же как и обычно под влиянием микроэлементов) этого не наблюдалось: процентное содержание сахара оказалось и в контроле и при стимуляции практически одинаковым.

Измерение радиоактивности показало, что содержание ее в ботве и корнеплодах столь незначительно (10^{-9} кюри на 1 кг сырого веса), что его можно считать вполне толерантным. В неочищенном препарате сахара при помощи счетных установок «Б» радиоактивности установить не удалось. Столь низкое содержание радиоактивности в корнеплодах и ботве несомненно имеет несколько причин. Прежде всего семена сахарной свеклы очень мелки, из-за чего в них не может образоваться большое депо излучателей, как в более крупных семенах злаков и особенно зернобобовых. Важно и то, что семена сахарной свеклы покрыты довольно толстой деревянистой оболочкой, которая, во-первых, несколько задерживает поступление излучателей в семя, а во-вторых, не служит резервным питательным веществом для растения в отличие от семядолей, отчего радиоактивность из оболочки в растение поступать не может. Наконец, ко времени сгнивания деревянистой оболочки в почве и освобождения содержавшейся в ней радиоактивности корни сахарной свеклы успевают прорасти далеко в глубь и не используют эту радиоактивность. В результате всего этого в растениях сахарной свеклы, выросших из семян, замоченных в растворе смеси осколков урана, накопление излучателей оказывается ничтожным.

Итак, замачивание семян сахарной свеклы в растворе излучателей дало положительный эффект. Метод замачивания семян в растворе осколков

[1] Н. А. Порядкова, Н. В. Тимофеев-Ресовский, Н. В. Лучник. Проблема радиостимуляций растений. VI. Опыты по облучению семян гороха и пшеницы рентгеновскими и γ-лучами на разных стадиях замачивания и прорастания (см. настоящий сборник).

урана был испытан на 14 других видах культурных растений в лабораторных и полевых опытах, а также в производственных посевах (Тимофеев-Ресовский, Порядкова, Макаров, Преображенская, 1957), и почти во всех случаях был получен положительный эффект.

В литературе имеются указания на получение радиостимуляционного эффекта при обработке семян сахарной свеклы растворами радиофосфора и радиоцинка (Власюк, 1955). Таким образом, все эти опыты доказывают реальность радиостимуляции растений, в том числе и сахарной свеклы, при замачивании семян в растворах β-излучателей. Однако для широкого практического применения метод замачивания малопригоден. При его использовании в течение ряда лет и на большом числе культур в почве будет накапливаться радиоактивность от остатков замоченных семян, о вреде которой говорить не приходится. Однако в отдельных случаях, например на некоторых технических культурах или в лесоводстве, для ускорения прорастания и увеличения всхожести семян древесных пород, этим методом можно воспользоваться, отдавая при этом предпочтение короткоживущим изотопам. Что же касается практического применения различных ионизирующих излучений в качестве стимулирующего агента на пищевых и кормовых культурах, то при современном состоянии наших знаний следует сконцентрировать свое внимание главным образом на поисках оптимальных стимулирующих доз при облучении семян извне.

ВЫВОДЫ

1. С сахарной свеклой были поставлены следующие опыты: один лабораторный опыт по изучению влияния замачивания семян в растворе смеси осколков урана на процент прорастания, два полевых опыта с замачиванием семян в том же растворе и облучением их извне γ-лучами.

2. В лабораторном опыте замачивание семян в растворе излучателей повысило их прорастаемость с 37 в контроле до 52%.

3. В полевом опыте первого года всхожесть семян, замоченных перед посевом в растворе осколков урана концентрацией 1 мкюри/л, возросла по сравнению с контролем на 33%; в этом же варианте при уборке пятинедельных растений установлено увеличение их общего веса на 38%. Эти результаты вполне достоверны. Небольшое увеличение по сравнению с контролем всхожести и общего веса растений при γ-облучении в дозе 250 *r* оказалось нереальным.

4. В опыте второго года замачивание семян в тех же условиях дало превышение контроля по всхожести на 29%, по общему весу пятинедельных растений — на 109% и по среднему весу одного растения — на 50%. При конечной уборке урожая в этом опыте получено превышение контроля по весу ботвы на 30% и по среднему весу корнеплода — на 33%.

5. При определении содержания сахара в контрольных и стимулированных корнеплодах реальной разницы не было обнаружено.

6. Радиоактивность стимулированных растений незначительно превышает контроль и составляет около 10^{-9} кюри на 1 кг сырого веса, т. е. находится вполне в пределах толерантности.

ЛИТЕРАТУРА

Атабекова А. И. О стимулирующем действии лучей Рентгена на растения. «Природа», 1938, № 7—8.

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

Бреславец Л. П., Милешко З. Ф., Языкова В. А. Изучение действия малых доз лучей Рентгена и радиоизотопа кобальта на вегетацию растений. Тр. научн. сессии, посвященной достижениям и задачам советской биофизики в сельском хозяйстве. М., Изд-во АН СССР, 1955.

Власюк П. А. Действие ядерных излучений на растения. Сессия АН СССР по мирному использованию атомной энергии. Отд. биол. наук. М., Изд-во АН СССР, 1955.
Порядкова Н. А. Методика и результаты некоторых опытов по радиостимуляции растений. «Биофизика», 1956, т. I, № 7.
Тимофеев-Ресовский Н. В., Порядкова Н. А., Макаров Н. М., Преображенская Е. И. Проблема радиостимуляции растений. I. О действии слабых доз ионизирующих излучений на растения. Тр. Ин-та биол. УФАН СССР, вып. 9. Свердловск, 1957.
Школьник М. Я. Значение микроэлементов в жизни растений и в земледелии. М.— Л., Изд-во АН СССР, 1950.
Loiseleur J. et Sauvage M. L'évolution secondaire des molécules à radical phénolique, posterieurement à leur irradiation par les rayons X. Comptes rendus, 1953, 237 (2), p. 204—206.

АКАДЕМИЯ НАУК СССР
УРАЛЬСКИЙ ФИЛИАЛ
Вып. 12 ТРУДЫ ИНСТИТУТА БИОЛОГИИ 1960

Н. В. ЛУЧНИК

ПРОБЛЕМА РАДИОСТИМУЛЯЦИИ РАСТЕНИЙ

V. ЦИТОЛОГИЧЕСКИЙ АНАЛИЗ ЯВЛЕНИЯ РАДИОСТИМУЛЯЦИИ

ВВЕДЕНИЕ

В последнее время большой интерес проявляется к изучению биологического действия малых доз ионизирующих излучений. Если в литературе прошлых лет основное внимание уделяли действию больших доз, считая, что полученные результаты можно экстраполировать на сколь угодно малые дозы, то новейшие исследования показали, что это не так. С одной стороны, имеются данные, говорящие о том, что даже в случае простейших реакций (так называемых «одноударных», или «реакций одного попадания») в области малых доз могут наблюдаться отклонения от прямой пропорциональности эффекта дозе (Лучник, 1957). С другой стороны, в последнее время было окончательно доказано, что большие и малые дозы могут оказывать на облучаемые организмы качественно различный эффект в том смысле, что при малых дозах вместо обычного угнетения жизненных функций наблюдается их стимуляция (Жежель, 1955; Власюк, 1955; Тимофеев-Ресовский, Порядкова, Макаров и Преображенская, 1957). В связи с этим экспериментальное изучение биологического эффекта малых доз облучения представляется интересным по меньшей мере с трех точек зрения: во-первых, для более точного установления толерантных доз при работе с излучениями и излучателями, во-вторых, для разработки новых путей применения атомной энергии в сельском хозяйстве, промышленности и медицине и, в-третьих, для более глубокого и полного познания закономерностей действия ионизирующих излучений на живые организмы.

В нашей лаборатории действие малых доз на культурные растения и некоторые другие организмы изучается с 1949 г. Результаты соответствующих опытов, описанные в статье Тимофеева-Ресовского, Порядковой, Макарова и Преображенской (1957), показывают, что слабые дозы ионизирующих излучений оказывают стимулирующее действие на рост и развитие растений и повышают их урожайность. В этих опытах не ограничивались только установлением самого факта радиостимуляции, но обращали внимание на самые разнообразные признаки в надежде на то, что такие сопутствующие наблюдения помогут лучше понять механизм исследуемого явления. В этом отношении к очень важным последствиям привело одно, на первый взгляд довольно несущественное,

наблюдение: у стимулированных растений сухой вес, как правило, оказывался выше, чем у контрольных. У растений сухой вес определяется в основном весом клеточных перегородок и так как увеличение объема клеток идет пропорционально кубу, а рост поверхности — только квадрату линейных размеров, можно было предполагать, что у стимулированных растений величина клеток в среднем меньше, чем в контроле.

Следовательно, раз у стимулированных растений биомасса больше, а размер отдельных клеток меньше, то общее число клеток в таких растениях выше, чем в контрольных. На этом основании была высказана гипотеза, согласно которой в основе радиостимуляции лежит ускорение процесса клеточного деления. Ниже описываются опыты, поставленные с целью проверки и дальнейшего развития этой гипотезы.

Тот факт, что в стимулированных растениях клетки мельче, чем в контрольных, был подтвержден непосредственными наблюдениями. С. Р. Царапкин подверг сравнительному биометрическому анализу ткани контрольных, стимулированных и подавленных облучением растений гороха. Объектом измерения служили клетки устьиц листа и субкутикулярного слоя стеблей. В обоих случаях получилась сходная картина. Из результатов этих измерений, приведенных в табл. 1, видно, что клетки у стимулированных растений мельче, чем у контрольных, а у подавленных, наоборот, крупнее. Аналогичные результаты были получены

Таблица 1

Результаты вариационно-статистического анализа размера клеток из стимулированных и подавленных растений гороха в условных единицах (по неопубликованным данным С. Р. Царапкина)

Вариант опыта	Длина клеток	Разница
	Клетки устьиц листа	
Контроль	$1{,}148 \pm 0{,}006$	—
Стимуляция	$1{,}027 \pm 0{,}006$	$-0{,}12 \pm 0{,}008$
Подавление	$1{,}289 \pm 0{,}008$	$+0{,}14 \pm 0{,}010$
	Клетки субкутикулярного слоя стебля	
Контроль	$3{,}964 \pm 0{,}06$	—
Стимуляция	$2{,}824 \pm 0{,}04$	$-1{,}140 \pm 0{,}07$
Подавление	$4{,}620 \pm 0{,}05$	$+0{,}656 \pm 0{,}08$

Е. Н. Сокуровой (1956) на бактериях. В опытах с клубеньковыми бактериями и азотобактером было обнаружено, что внесение в окружающую среду излучателей ведет при определенных условиях к стойкому увеличению бактериальной массы. Микроскопические наблюдения показали, что увеличение биомассы и здесь идет за счет увеличения числа клеток, так как в стимулированных культурах средняя длина клеток была несколько меньше, чем в контрольных, а абсолютное число клеток значительно выше. Фактический материал по этим опытам приведен в цитированных выше работах. Таким образом, предположение, высказанное на основании анализа сухого веса, вполне подтвердилось, в связи с чем особый интерес приобретало цитологическое исследование феномена радиостимуляции [1].

Подобное исследование представлялось весьма обещающим и в связи с тем, что вредное биологическое действие излучений в значительной

[1] До сих пор очень мало работ, посвященных изучению цитологического действия малых стимулирующих доз ионизирующей радиации (Бреславец, 1946).

мере связано с клеточными поражениями и цитологический анализ мог бы принести ощутимую пользу при изучении механизма этих действий (Lea, 1946; Timofeeff-Resovsky u. Zimmer, 1947).

В настоящей работе описываются опыты по влиянию растворов α- и β-излучателей на динамику и морфологию клеточного деления в меристеме гороха; особое внимание уделяется действию слабых концентраций.

В проведении всех описываемых опытов принимал активное участие Л. С. Царапкин. Расчеты доз облучения произведены Н. В. Горбатюком.

МАТЕРИАЛ И МЕТОДИКА

Все опыты, описываемые в настоящей работе, поставлены на горохе сорта «Капитал». Семена облучались посредством замачивания в течение 24—26 час. в растворах излучателей. В качестве излучателей использовались радий, торий-X или неразделенная смесь радиоизотопов, образующихся при делении урана. В табл. 2 приведен состав применявшегося нами раствора вместе с характеристиками соответствующих изотопов. При таких условиях воздействия определение физической дозы облучения довольно затруднительно и должно производиться экспериментально.

Таблица 2

Радиохимический состав применявшегося раствора смеси продуктов деления урана и основные характеристики входящих в него изотопов

Изотоп	Период полураспада	Максимальная энергия β-лучей (в MeV)	Средняя энергия β-лучей (в MeV)	Энергия γ-лучей (в MeV)	Постоянная γ-излучения	Содержание в смеси (в %)
$_{38}Sr^{90}$	19,9 года	0,54	1,116	—	—	5,45
$_{39}Y^{90}$	2,54 дня	2,27		—	—	5,45
$_{39}Y^{91}$	61 день	1,56	0,607	—	—	0,15
$_{40}Zr^{95}$	65 дней	0,36(95%)	0,165	0,23—0,93	10,0	0,40
$_{41}Nb^{95}$	38,7 дня	0,15		0,02—0,77		0,72
$_{44}Ru^{106}$	290 дней	0,04	1,529	—	—	3,46
$_{45}Rh^{106}$	30 сек.	3,51(68%)		0,52—2,42	1,3	3,46
$_{55}Cs^{137}$	33 года	0,52(92%)	0,182	0,661	3,7	4,85
$_{58}Ce^{144}$	282 дня	0,31(97%)	0,103	0,03—0,23	0,12	31,50
$_{59}Pr^{144}$	17,5 мин.	2,97(85%)	1,242	0,06—2,19		31,50
$_{61}Pm^{147}$	2,26 года	0,22	0,062	—	—	12,70

Примечание: 1. Для изотопов со сложным β-спектром приведена максимальная энергия преобладающей компоненты. 2. Содержание остальных изотопов меньше 0,5%, в том числе: $_{63}Eu^{155}$ — 0,21%, $_{51}Sb^{125}$ — 0,24%, $_{38}Sr^{89}$ — 0,06%, $_{44}Ru^{103}$ — 0,05%, $_{52}Te^{127}$ — 0,01% и т. д.

Для приблизительной ориентировки дозы облучения были определены расчетным способом. Результаты расчетов приведены в табл. 3.

Приведенные дозы следует считать ориентировочными, так как при их расчете был допущен ряд упрощений. В частности, при этом учтена

Таблица 3

Дозы облучения, полученного семенами, помещенными в растворы излучателей, при концентрации 1 мкюри/л

Раствор	Доза (в фэр)			
	α-излучения	β-излучения	γ-излучения	общая
Ra^{226} в равновесии	1336	64	5	1405
$MsTh^{228}$ в равновесии	1740	83	5	1828
Смесь β-излучателей	—	24,5	0,4	25

Примечание. Расчет произведен для удельной активности в 1 мкюри/л при замачивании в течение суток 25 г семян, помещенных в шаровую колбу, емкостью 120 куб. см (расчетные данные Н. В. Горбатюка).

только доза, получаемая семенами во время замачивания. Однако ввиду значительного поглощения радиоактивности доза, получаемая семенами после замачивания, может быть настолько велика, что ее необходимо учитывать. Тем не менее при таких кратковременных опытах, как описываемые ниже, вычисленные физические дозы при всех возможных ошибках не могут отличаться от истинных более чем вдвое.

После замачивания семена помещались в чашки Петри на влажный песок, покрытый фильтровальной бумагой. В большинстве опытов они выдерживались в темноте при температуре 22° С.

Через разное время после воздействия кончики корней фиксировались в смеси этилового спирта с уксусной кислотой 3 : 1 (раствор Фармера) или в смеси спирта, хлороформа и уксусной кислоты 6 : 1 : 3 (раствор Карнуа). После фиксации, продолжавшейся от 2 до 24 час., материал переносился для хранения в 70%-ный спирт. Исследование производилось на временных давленых препаратах. Такая методика наряду с быстротой и простотой обладает по сравнению с изготовлением срезов тем преимуществом, что при ней не теряется материал и клетки не повреждаются микротомным ножом, а самый препарат представляет собой один слой неповрежденных клеток. Подробности этой методики описаны в соответствующих руководствах (Darlington a. La Cour, 1942; Smith, 1947). Для окраски применялись реактив Фейльгена, уксуснокислый кармин или уксуснокислый лакмоид. Последний краситель оказался наиболее удобным для массовой работы.

Наряду с наблюдением общей морфологической картины количественно учитывались митотическая активность (процент делящихся клеток) и процент ненормальных митозов. Как показали наши наблюдения, в согласии с данными других авторов (Pekarek, 1927; Gelin, 1941), митотическая активность в разных частях меристемы неодинакова и уменьшается в порядке: периблем, плером, дерматоген и калиптроген. По длине корешка митозы распределены также неравномерно: дистальный конец корешка практически свободен от митозов, наибольшее их число наблюдается на расстоянии около 0,5 мм от конца, дальше к основанию оно постепенно убывает. Что касается процента ненормальностей, то он приблизительно одинаков во всех частях корешка. Поэтому митотическую активность мы определяли по клеткам периблема на участке 0,5—1,5 мм от дистального конца. Патологические отклонения учитывались в периблеме и плероме на участке 0,5—3,0 мм. При этом подсчитывалось число хроматиновых мостиков и фрагментов в каждой клетке; за ненормальные считались клетки, имеющие хотя бы один мостик или фрагмент.

Учитывались клетки, видимые с экватора, начиная с поздней анафазы, когда хромосомы уже достаточно разошлись к полюсам, и кончая ранней телофазой, когда процесс денуклеинации и деспирализации еще не закончен. Митотическая активность подсчитывалась в каждом корешке в десяти разных участках.

РЕЗУЛЬТАТЫ ОПЫТОВ

При изложении полученных результатов мы вначале опишем общую цитологическую картину, наблюдавшуюся в наших опытах; после этого будут более подробно рассмотрены данные, касающиеся признаков, учитывавшихся количественно — митотической активности и ненормальностей митоза, сначала при действии β-, а затем — α-излучателей.

ОБЩИЕ НАБЛЮДЕНИЯ

Морфология нормальной клетки гороха изучалась рядом авторов (Левитский, 1931; Атабекова, 1936), поэтому мы не будем здесь подробно на ней останавливаться. Следует отметить только, что в нашем материале наблюдалась большая изменчивость клеток по форме и величине, а также по числу ядрышек, которое колеблется между одним и двумя; изредка встречаются клетки с тремя ядрышками. Иногда в контрольном материале встречаются ненормальности: симметричная двуядерность, полиплоидные клетки, хроматиновые мостики и отставание отдельных хромосом в анафазе. Все эти изменения очень редки. Фрагменты вообще не встречаются, точно так же как и мостики в телофазе.

В материале, замоченном в растворе β-излучателей, прежде всего обращает на себя внимание резко возросшее число профаз. Точка роста также увеличена по сравнению с контролем. Ненормальные клетки встречаются редко, число их во всех примененных дозах мало отличается от контроля. Симметричная двуядерность, «клейкость» хромосом, увеличенное число ядрышек (до пяти) и мостики встречаются чаще, чем в контроле, изредка попадаются фрагменты. Часты гетеропикнотические ядра. Характерна слабая окраска ядра; при продолжительной окраске лакмоидом наблюдается инвертированная окраска: слабо окрашенное ядро в окрашенной плазме. Причина этого явления пока неясна. Так как оно довольно хорошо коррелирует с митотической активностью, то мы склонны считать его следствием быстрого деления, тем более что есть указания на то, что в быстро делящихся клетках иногда наблюдается отрицательная ядерная реакция (Brachet, 1929; Bauer, 1933). По величине клетки в среднем мельче, чем в контрольном материале. Во всех фазах встречаются, хотя и довольно редко, дегенерирующие клетки.

В корешках, выросших из семян, намоченных в растворах α-излучателей, митотическая активность, точно так же как и величина клеток, при всех дозах не отличается заметно от контрольной. Ненормальные клетки встречаются чаще, чем в материале, замоченном в растворе β-излучателей, причем число их с повышением дозы заметно возрастает. Даже при самой слабой дозе ненормальности встречаются чаще, чем при самом интенсивном действии β-излучателей. Первичные изменения (слипание хромосом и гетеропикноз в метафазе и анафазе) здесь, так же как и при намачивании в β-излучателях, значительно более редки, чем вторичные (мостики и фрагменты). С повышением дозы увеличивается число клеток с мостиками и фрагментами, начинает наблюдаться укорочение хромосом в метафазах, попадаются «кольца». Часты метафазные пластинки с ненормальной ориентировкой хромосом и анафазы

с отстающими хромосомами. При еще более высоких дозах облучения часто встречаются клетки с асимметричной двуядерностью и многоядерностью. При наибольшей дозе почти во всех делящихся клетках на различных стадиях митоза наблюдаются те или иные ненормальности. При внешнем осмотре корешки во всех сериях опытов не обнаруживают заметных отклонений от контроля.

Опыты с β-излучателями

Исходя из нарисованной выше общей картины цитологического действия растворов излучателей, представлялось важным исследовать количественно частоту митозов, а также частоту ненормальных митозов. Данные о частоте клеточных делений в контроле и после воздействия разными концентрациями смеси β-излучателей через 70 час. после замачивания приведены в табл. 4.

Из этой таблицы видно, что слабые концентрации раствора β-излучателей (0,25—2,0 мкюри/л) значительно повышают против нормы про-

Таблица 4

Влияние суточного замачивания семян в смеси β-излучателей на темп деления клеток меристемы гороха (через 70 час. после суточного замачивания)

Концентрация излучателя (в мкюри/л)	Доза облучения (в фэр)	Число исследованных клеток	Число делящихся клеток					Процент делящихся клеток
			профаза	метафаза	анафаза	телофаза	всего	
Первый опыт								
Контроль	—	8 000	415	180	70	100	765	9,6±0,33
0,5	14	8 000	3222	212	77	50	3561	44,5±0,56
1,0	27	8 000	2134	256	83	60	2533	31,7±0,52
2,0	54	7 000	1005	207	104	71	1387	19,8±0,48
Второй опыт								
Контроль	—	5 000	451	99	46	43	639	12,8±0,47
0,25	7	5 000	1309	132	49	56	1546	30,9±0,65
0,5	14	5 000	2262	100	35	38	2435	48,7±0,71
1,0	27	4 000	440	53	28	19	540	13,5±0,54
Третий опыт								
Контроль	—	1 500	100	17	10	9	136	9,1±0,74
0,25	6	1 000	122	31	27	34	214	21,4±1,30
0,5	13	1 000	55	18	10	5	88	8,8±0,90
1,0	25	1 000	33	24	11	13	81	8,1±0,86
5,0	125	1 500	73	53	19	29	174	11,6±0,83
10,0	250	1 500	84	42	20	28	174	11,6±0,83
Суммарные данные								
Контроль	—	14 500	966	296	126	152	1540	10,6±0,25
0,25	7	6 000	1431	163	76	90	1760	29,3±0,59
0,5	14	14 000	5539	330	122	93	6084	43,5±0,42
1,0	27	13 000	2607	333	122	92	3174	24,4±0,38
2,0	54	7 000	1005	207	104	71	1387	19,8±0,48
5,0	125	1 500	73	53	19	29	174	11,6±0,83
10,0	250	1 500	84	42	20	28	174	11,6±0,83

цент делящихся клеток. При более высоких концентрациях (5 и 10 мкюри/л) митотическая активность не отличается от контрольной. Следует заметить, что повышение митотической активности идет главным образом за счет увеличения числа профаз.

Из рис. 1 видно, что процент профаз при оптимальной концентрации (0,5 мкюри/л) повышается почти в семь раз, тогда как процент других

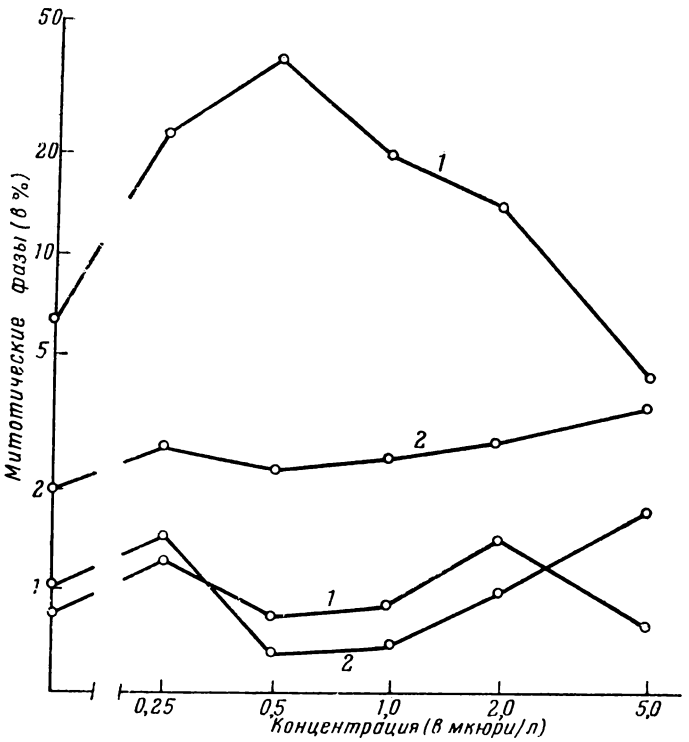


Рис. 1. Процент разных фаз клеточного деления в корнях гороха через 70 часов после замачивания семян в растворах смеси β-излучателей разной концентрации

фаз ни в одной серии опытов не повышается даже вдвое. В связи с таким неравномерным повышением числа разных фаз деления может казаться, по аналогии с общеизвестным действием колхицина, что повышение числа профаз является следствием не стимулирующего, а подавляющего действия излучений. Колхицин, являясь сильным митотическим ядом, влияет на образование веретена, в связи с чем в ткани наблюдается резкое повышение числа метафаз. Точно так же и наши данные могут быть истолкованы так, что облучение блокирует переход от профазы к метафазе. Однако если бы это действительно имело место, то процент профаз должен был бы повышаться с повышением дозы облучения, в опыте же мы обнаруживаем вполне определенный оптимум, необъяснимый с точки зрения подавляющего действия лучей. Подобное предположение совершенно не вяжется и с тем фактом, что общая скорость роста корней в этих опытах не уменьшается, а увеличивается, а также с тем, что в опытах с α-излучателями, не вызывающими стимуляции роста, также не наблюдается и повышенное число митозов. Грей и Скулс (Gray a. Scholes, 1951), исходя из совершенно других данных и соображений, тоже считают, что повышение в результате облучения процента делящихся клеток не может истолковываться как следствие

торможения митоза. Они облучали корни конских бобов подавляющей рост дозой и, тем не менее, наблюдали повышение митотической активности. Однако в их опытах наблюдалось большое число ненормальных клеток и уменьшение точки роста. Поэтому два последних эффекта перекрывали повышение скорости митоза. В наших же опытах, как уже было сказано, точка роста оказывалась увеличенной, а процент ненормальных клеток был довольно мал.

В табл. 5 приведены данные о числе ненормальных митозов через 70 час. после намачивания семян в растворах смеси β-излучателей разной концентрации.

Таблица 5

Влияние суточного замачивания семян в смеси β-излучателей на ненормальности митоза в анафазе и телофазе (через 70 час. после замачивания)

Концентрация излучателя (в мкюри/л)	Доза облучения (в фэр)	Число исследованных клеток	Клеток					
			с мостиками		с фрагментами		ненормальных	
			число	%	число	%	число	%
Первый опыт								
Контроль	—	355	24	6,8±1,4	0	—	24	6,8±1,4
0,5	14	455	40	8,8±1,3	4	0,9±0,4	43	9,5±1,4
1,0	27	626	74	11,8±1,3	17	2,7±0,5	89	14,2±1,4
2,0	54	502	69	13,8±1,5	22	4,4±0,9	104	20,7±1,8
Второй опыт								
Контроль	—	250	10	4,0±1,2	0	—	10	4,0±1,2
0,25	7	190	24	12,6±2,4	1	0,5±0,5	24	12,6±2,4
0,5	14	260	24	9,2±1,8	2	0,8±0,6	26	10,0±1,9
1,0	27	110	16	14,5±3,4	2	1,8±1,3	17	15,4±3,4
Третий опыт								
Контроль	—	200	2	1,0±0,7	0	—	2	1,0±0,7
0,25	6	50	8	16,0±5,2	0	—	8	16,0±5,2
0,5	13	50	9	18,0±5,4	0	—	9	18,0±5,4
1,0	25	50	10	20,0±5,7	1	2,0±2,0	10	20,0±5,7
5,0	125	150	12	8,0±2,2	15	10,0±2,5	22	14,7±2,9
10,0	250	150	25	16,7±3,0	11	7,3±4,5	33	22,0±3,4
Суммарные данные								
Контроль	—	805	36	4,5±0,7	0	—	36	4,5±0,7
0,25	7	240	32	13,3±2,2	1	0,4±0,4	32	13,3±2,2
0,5	14	765	73	9,5±1,1	6	0,8±0,3	78	10,2±1,1
1,0	27	786	100	12,7±1,2	20	2,5±0,6	116	14,7±1,3
2,0	54	502	69	13,8±1,5	22	4,4±0,9	104	20,7±1,8
5,0	125	150	12	8,0±2,2	15	10,0±2,5	22	14,7±2,9
10,0	250	150	25	16,7±3,0	11	7,3±4,5	33	22,0±3,4

Приведенные данные показывают, что хотя процент ненормальных клеток статистически реально повышен по сравнению с контролем, абсолютное число таких клеток невелико. Обращает на себя внимание и тот факт, что хотя даже при самой низкой концентрации процент ненормальных митозов повышен по сравнению с контролем почти втрое,

при дальнейшем повышении концентрации излучателей в 40 раз процент ненормальных клеток увеличивается меньше чем вдвое. Этот диспропорциональный эффект малых доз был специально рассмотрен нами в другой работе [1], а потому здесь мы не будем на нем подробно останавливаться. Мы объясняем данное явление неодинаковой чувствительностью к радиации разных клеток, что особенно ярко проявляется при продолжительном облучении, так как за это время клетки успевают претерпеть значительные изменения.

Факт повышения митотической активности после облучения не нов и сам по себе не может служить ни доказательством связи между митотической активностью и общей стимуляцией, ни того обстоятельства, что повышенная митотическая активность является непосредственным следствием облучения. Во многих опытах, где наблюдалась после облучения повышенная митотическая активность, оказывалось, что это повышение следует за понижением и носит компенсаторный характер, общее же число митозов не изменяется, или даже ниже, чем в контроле (Lea, 1946). Что же касается причины повышения митотической активности, то многие авторы, начиная с Габерландта (Haberlandt, 1921), считают, что продукты, возникающие при гибели и распаде клеток, так называемые некрогормоны, стимулируют деление клеток. Некоторые авторы (Заварзин и Стрелин, 1928) убедительно показали, что в ряде опытов стимулирующее действие радиации следует отнести именно за счет гибели части клеток. На вопрос о том, могут ли эти процессы играть роль в наших условиях, дают ответ опыты по изучению митотической активности и ненормальностей митоза через разное время после облучения. Полученные в этих опытах результаты изображены на рис. 2. Из этого рисунка видно, что в «стимулированных» проростках деление клеток начинается несколько позже, чем в контрольных. Вслед за этим следует длительная волна повышенной митотической активности, после чего она возвращается к норме. При этом повышение митотической активности значительно перекрывает начальное подавление. Общее число митозов за все время опыта, определявшееся как площадь между кривой и осью абсцисс, при замачивании в растворе излучателей концентрацией 0,25 мкюри/л примерно на 20% выше, чем в контроле. Что же касается числа ненормальных митозов, то здесь обращают на себя внимание два обстоятельства. Во-первых, процент ненормальных митозов при действии растворов в концентрациях 0,25, 0,5 и 1,0 мкюри/л почти одинаков; через трое суток после конца замачивания он равен соответственно 16, 18 и 20%, тогда как митотическая активность при соответствующих концентрациях составляет в то же время 225, 97 и 89% по сравнению с контролем. В связи с отсутствием корреляции между обоими показателями можно полагать, что поражение клеток и повышение митотической активности являются процессами, друг с другом не связанными. Кроме того, максимальное число митозов и максимум ненормальных митозов наблюдаются в одно и то же время. Между тем, если бы стимуляция деления клеток являлась следствием гибели других клеток, то максимум митотической активности должен был бы наблюдаться позже максимума ненормальных анафаз. Таким образом, весьма вероятно, что в основе радиостимуляции лежит стимуляция клеточного деления, происходящая при почти полном отсутствии патологических изменений в клетках.

В проблеме радиостимуляции большое значение имеет вопрос об изменчивости получаемых данных. В частности, важно выяснить, появ-

[1] Н. В. Лучник. Об анормальной реакции при малых дозах облучения. Биофизика, 1957, т. 2, № 1.

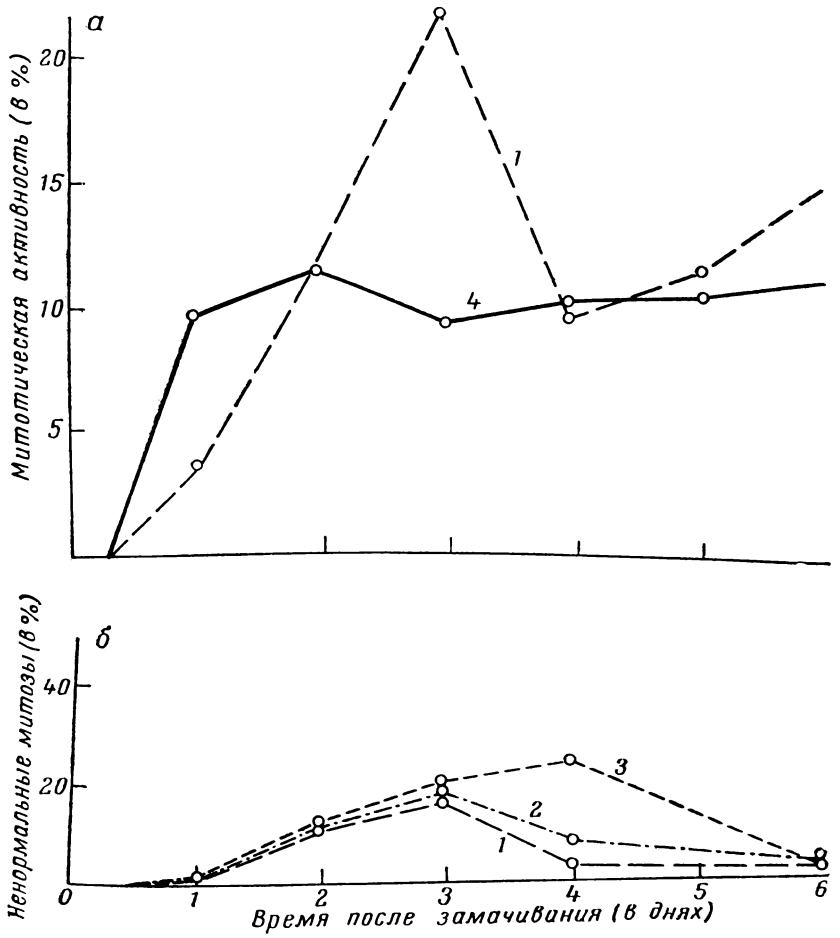


Рис. 2. Динамика изменения митотической активности (*а*) и процента ненормальных митозов (*б*) после замачивания семян в растворах β-излучателей разной концентрации
1 — 0,25 *мкюри/л*; *2* — *мкюри/л*; *3* — *мкюри/л*; *4* — контроль;

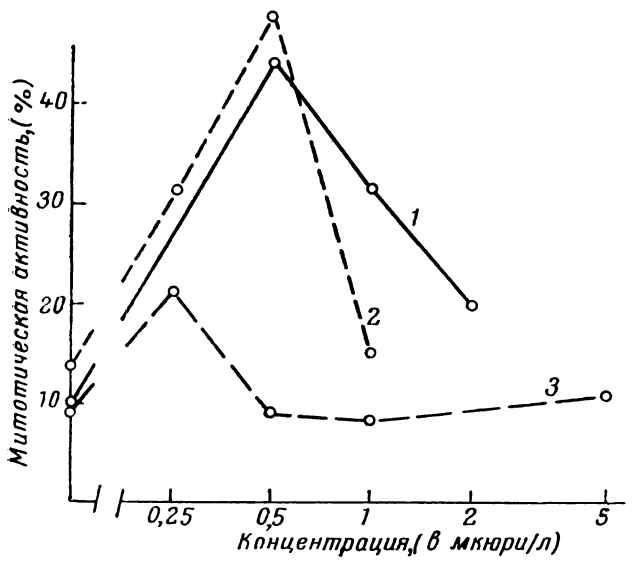


Рис. 3. Зависимость митотической активности в разные месяцы от концентрации раствора β-излучателей
(*1* — апрель, *2* — май, *3* — июнь)

ляется ли эта изменчивость в результате внутриклеточных изменений или это следствие вторичных процессов. На рис. 3 отображены результаты трех отдельных опытов, поставленных в апреле, мае и июне. Во всех опытах семена гороха замачивались в одинаковых условиях, однако результаты их оказались весьма различными. От опыта к опыту меняется как максимальная стимуляция митотической активности, так и оптимальная доза и ширина интервала стимулирующих доз. Что касается

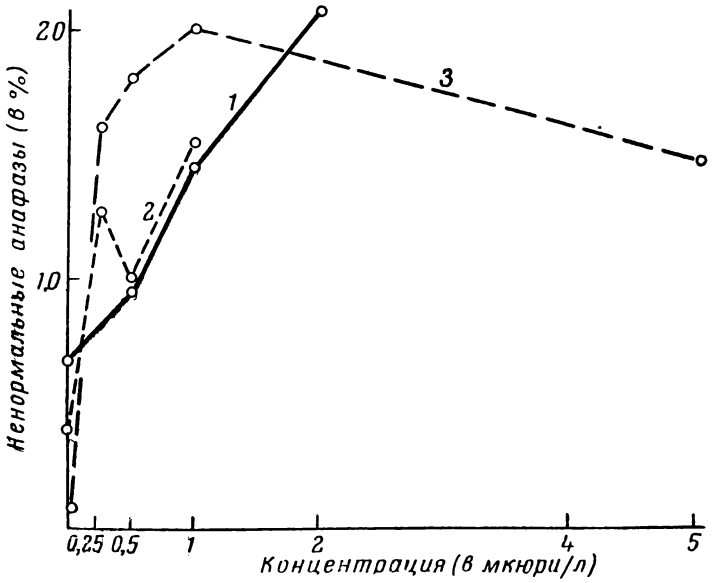


Рис. 4. Зависимость процента ненормальных митозов в разные месяцы от концентрации раствора β-излучателей

(*1* — апрель, *2* — май, *3* — июнь)

ненормальностей митоза (рис. 4), то здесь изменчивость результатов от опыта к опыту меньше.

Это также говорит за то, что стимуляция митотической активности и ненормальности клеточного деления обусловлены разными процессами.

Опыты с α-излучателями

Опыты с α-излучателями были поставлены для проверки выводов, следующих из описанных выше опытов. Бóльшая эффективность α-частиц по сравнению с β- и γ-лучами в отношении вызывания хромосомных разрывов хорошо известна (Lea, 1946). Вместе с тем известно, что проход α-частицы через ядро клетки вызывает в нем структурные изменения с вероятностью, близкой к единице (Kotval a. Gray, 1947). Поэтому можно было ожидать, что в опытах с намачиванием семян в растворах α-излучателей при тех же физических дозах будет наблюдаться больший процент ненормальных митозов и не будет обнаруживаться стимуляция митотической активности, так как в каждом ядре, через которое прошла α-частица, произойдут вредные изменения.

В табл. 6 приведены данные о митотической активности клеток в корешках гороха, выросшего из семян, замоченных в растворах α-излучателей (радий и торий-X) разных концентраций.

Итак, реальное повышение митотической активности наблюдалось только один раз при концентрации излучателя 0,012 мкюри/л и было

Таблица 6

Влияние суточного замачивания в растворах α-излучателей на темп деления клеток меристемы гороха (через 70 час. после замачивания)

Концентрация излучателя в мкюри/л	Доза облучения, (в фэр)	Число исследованных клеток	Число делящихся клеток					Процент делящихся клеток
			профаза	метафаза	анафаза	телофаза	всего	
Первый опыт (торий-Х)								
Контроль	—	8 000	415	180	70	100	765	9,6±0,33
0,025	50	10 000	673	261	83	86	1103	11,0±0,31
0,10	198	10 000	625	267	82	86	1060	10,6±0,31
Второй опыт (радий)								
Контроль	—	5 000	451	99	46	43	639	12,8±0,47
0,012	19	4 000	658	75	36	18	787	19,7±0,63
0,025	38	4 000	373	100	33	47	553	13,8±0,55
0,05	77	5 000	394	102	47	33	576	11,5±0,45
Третий опыт (радий)								
Контроль	—	1 500	100	17	10	9	136	9,1±0,74
0,012	19	1 000	40	25	13	32	110	11,0±1,00
0,025	38	1 000	44	24	11	18	97	9,7±0,93
0,05	77	1 000	78	27	11	10	126	12,6±1,05
0,25	381	1 000	106	24	5	3	143	14,3±1,11
0,50	762	1 000	69	36	11	11	127	12,7±1,06
Суммарные данные								
Контроль	—	14 500	966	296	126	152	1540	10,6±0,25
0,012	19	5 000	698	100	49	50	897	17,9±0,54
0,025	38	5 000	417	124	44	65	650	13,0±0,48
0,025	50	10 000	673	261	83	86	1103	11,0±0,31
0,05	77	6 000	472	129	58	43	702	11,7±0,42
0,10	198	10 000	625	267	82	86	1060	10,6±0,31
0,25	381	1 000	106	24	5	8	143	14,3±1,11
0,50	762	1 000	69	36	11	11	127	12,7±1,06

незначительно по абсолютной величине. В другом опыте с той же концентрацией не было отмечено повышения числа митозов, так что указанному повышению нельзя придавать серьезного значения. Однако вполне определенно можно утверждать, что если α-излучатели и стимулируют митотическую активность, то это происходит очень редко и абсолютная величина этой стимуляции незначительна. На рис. 5 сравнивается действие равных по физической дозе концентраций α- и β-излучателей на митотическую активность. Из рисунка видно, что при дозах, обусловливающих в случае β-излучателей значительную стимуляцию митотической активности, α-излучатели такого эффекта не дают. Тем не менее

небольшое повышение числа митозов при самой низкой концентрации α-излучателей делает интересным изучение действия таких и еще более низких концентраций на митоз. Если бы это наблюдение подтвердилось, оно могло бы явиться указанием на то, что стимуляция митоза происходит за счет абсорбции энергии не в ядре, а в других частях клетки (цитоплазма, ядрышко), так как при проходе α-частицы через ядро в нем почти всегда возникают гибельные для клетки изменения.

Что касается ненормальностей митоза, то здесь наблюдается диаметрально противоположная картина. Результаты, приведенные в табл. 7, и сравнение их на рис. 6 с аналогичными данными для β-излучателей, показывают, что α-частицы при той же физической дозе облучения вызывают значительно большее число ненормальных митозов, чем β-частицы.

Таблица 7

Влияние суточного замачивания семян в растворах α-излучателей на ненормальности митоза в анафазе и телофазе (через 70 час. после замачивания)

Концентрация излучателя (в мкюри/л)	Доза облучения (в фэр)	Число исследованных клеток	Клеток					
			с мостиками		с фрагментами		ненормальных	
			число	%	число	%	число	%
Первый опыт (торий-X)								
Контроль	—	355	24	6,8±1,4	0	—	24	6,8±1,4
0,025	50	550	182	33,2±2,0	54	9,8±1,3	226	41,2±2,1
0,10	198	550	339	61,7±2,1	176	32,0±2,0	446	81,1±1,7
Второй опыт (радий)								
Контроль	—	250	10	4,0±1,2	0	—	10	4,0±1,2
0,012	19	148	31	20,9±3,3	9	6,1±2,0	36	24,3±3,5
0,025	38	182	25	13,7±2,6	2	1,1±0,8	33	18,3±2,9
0,05	77	285	52	18,2±2,3	15	5,3±1,3	77	27,0±2,6
Третий опыт (радий)								
Контроль	—	200	2	1,0±0,7	0	—	2	1,0±0,7
0,012	19	50	13	26,0±6,2	6	12,0±4,6	15	30,0±6,5
0,025	38	50	12	24,0±6,0	8	16,0±5,2	14	28,0±6,3
0,05	77	465	135	29,0±2,1	48	10,3±1,4	161	34,6±2,2
0,25	381	99	56	56,6±5,0	62	62,7±4,9	86	86,9±3,4
0,50	762	50	26	52,0±7,1	32	64,0±6,8	44	88,0±4,6
Суммарные данные								
Контроль	—	805	36	4,5±0,7	0	—	36	4,5±0,7
0,012	19	198	44	22,2±3,0	15	7,6±1,9	51	25,8±3,1
0,025	38	232	37	15,9±2,4	10	4,3±1,3	47	20,3±2,6
0,025	50	550	182	33,2±2,0	54	9,8±1,3	226	41,2±2,1
0,05	77	750	187	25,0±1,6	63	8,4±1,0	238	31,8±1,7
0,10	198	550	339	61,7±2,1	176	32,0±2,0	446	81,1±1,7
0,25	381	99	56	56,6±5,0	62	62,7±4,9	86	86,9±3,4
0,50	762	50	26	52,0±7,1	32	64,0±6,8	44	88,0±4,6

Точное сравнение эффективности α- и β-излучения в отношении общего числа ненормальных клеток затруднительно из-за разной формы кривых эффекта дозы для двух типов излучателей. Для клеток с фрагментами, где кривые имеют одинаковую форму, оказывается, что α-частицы примерно в четыре раза более эффективны, чем β-частицы: для вызывания такого же эффекта нужно применять вчетверо большие концентрации β-излучателей. Такое сравнение является приближенным из-за

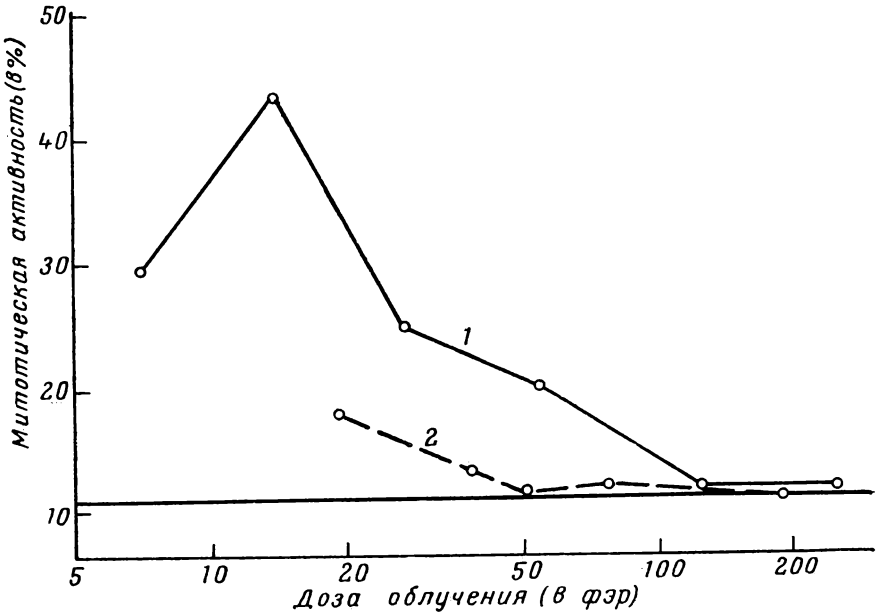


Рис. 5. Зависимость митотической активности от дозы α- и β-облучения
1 — β-лучи; *2* — α-лучи

того, что сравниваемые частоты малы по абсолютной величине; для более точного сравнения необходимы опыты с более высокими дозами.

Таким образом, опыты с растворами α-излучателей подтвердили сделанные выше выводы. В заключение заметим, что еще одно подтверждение точки зрения, согласно которой общий эффект облучения на рост растений связан с цитологическими действиями лучей, можно получить из сравнения цитологических и общих эффектов. Такое сравнение произведено на рис. 7. Здесь сопоставлены, с одной стороны, стимуляция роста и клеточного деления в опытах с β-излучателями и, с другой, подавление роста и процент нормальных митозов в опытах с α-излучателями. В обоих случаях соответствие оказывается хорошим, поэтому можно считать, что подавление роста растений после облучения происходит в значительной мере за счет гибели клеток, происходящей в результате хромосомных аберраций, а стимуляция — за счет повышения темпа клеточного деления.

ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ

Результаты, полученные в описанных выше опытах, можно кратко резюмировать следующим образом. При радиостимуляции растений происходит значительное усиление митотической активности, хорошо коррелирующее с общим эффектом и происходящее на фоне незначительных патологических изменений. При воздействии β-лучей наблюдается значительная стимуляция митотической активности, тогда как

α-лучи такой стимуляции не вызывают. Наряду с этим эквивалентные физические дозы α-лучей вызывают значительно большее число ненормальных митозов.

Переходя к обсуждению полученных данных, следует прежде всего подчеркнуть, что эти опыты, запланированные и осуществленные исходя

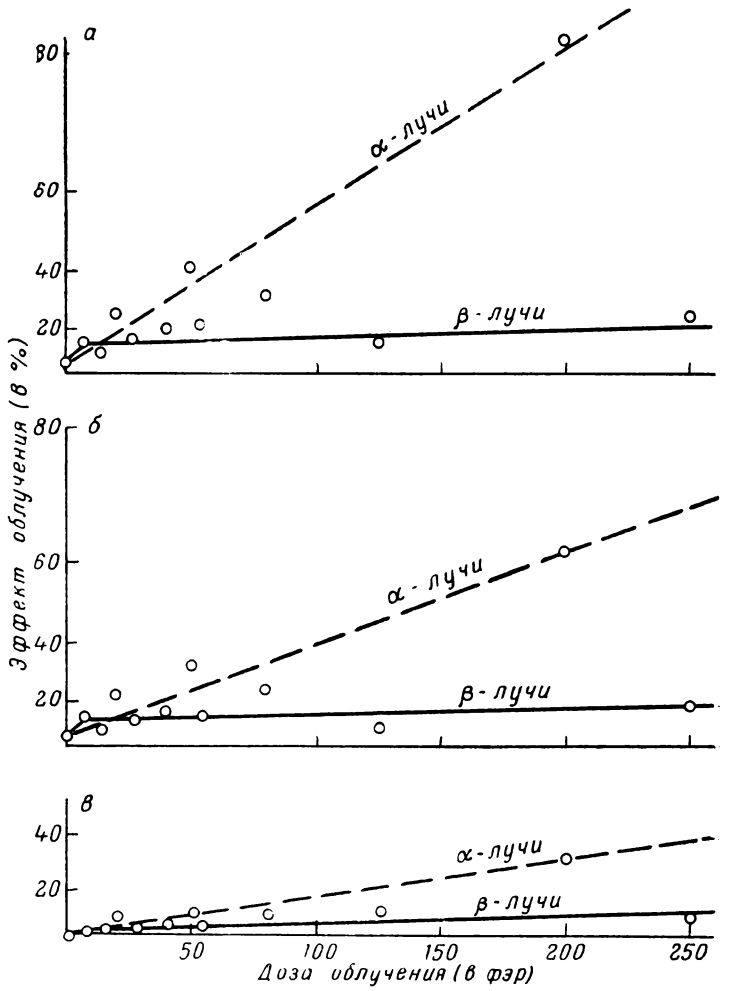


Рис. 6. Зависимость процента патолсгических митозов от дозы α- и β-облучения

а — общее число ненормальных клеток; *б* — клетки с мостиками; *в* — клетки с фрагментами

из некоторых случайных наблюдений и общих биофизических соображений, дали результаты, вполне соответствовавшие ожидавшимся. В связи с этим чрезвычайно интересно подвергнуть цитологические данные биофизическому анализу. Однако для достаточно точных выводов необходим более обширный и разнообразный материал. Поэтому мы здесь ограничимся только некоторыми сопоставлениями, не прибегая к более точным расчетам.

Прежде всего необходимо рассмотреть вопрос о числе и природе первичных физических процессов, вызывающих появление патологических митозов при замачивании семян гороха в растворах радиоизотопов. Как мы видели (см. рис. 6), зависимость эффекта от дозы изображается

как для α-, так и для β-излучателей в полулогарифмическом масштабе прямой линией, т. е. следует экспоненциальному закону. Указанное обстоятельство вполне определенно говорит за то, что наблюдаемый эффект вызывается проходом одной ионизирующей частицы. Это противоречит данным, полученным на спермиях дрозофиллы, микроспорах традесканции и проростках бобов (Lea, 1946; Timofeeff-Resovsky u. Zimmer, 1947). На этих объектах частицы с большой плотностью ионизации

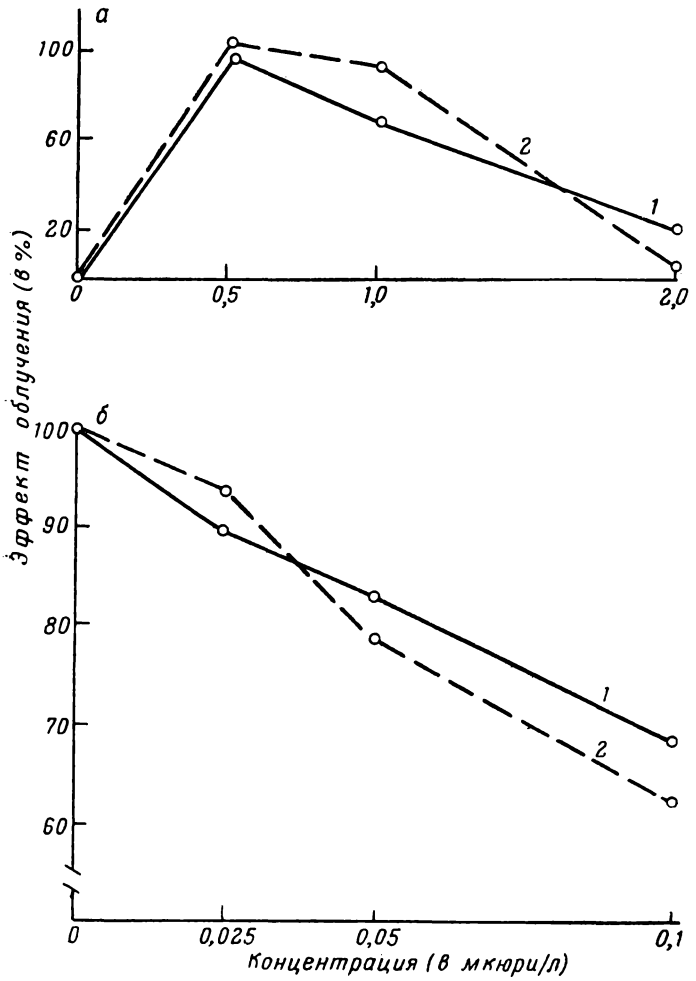


Рис. 7. Корреляция между общим и цитологическим эффектом облучения:

а — делящиеся клетки (*1*) и вес зеленой массы (*2*) — из опыта с β-излучателями; *б* — клетки без фрагментов (*1*) и вес зеленой массы (*2*) — из опытов с радием

(протоны отдачи, α-частицы) тоже дают экспоненциальные кривые одного попадания, что же касается быстрых электронов (в виде β-частиц или вторичных электронов при рентгеновском или γ-облучении), то они для разрывов дают кривую одного попадания, а для перестроек — кривую двух попаданий, так что суммарный эффект для общего числа ненормальных клеток возрастает приблизительно пропорционально 1,5 степени дозы облучения. Такое расхождение с литературными данными можно объяснить по-разному. Во-первых, можно думать, что в применен-

ном диапазоне доз на каждое ядро приходится не больше одного эффективного прохода β-частицы, в связи с чем изменения, для которых нужны два попадания, не могут происходить. Во-вторых, подобный эффект можно относить за счет большой продолжительности облучения, так как известно, что при растянутом облучении число изменений, вызываемых двумя попаданиями, резко падает. В-третьих, эта разница может объясняться тем, что в наших опытах мы воздействовали на покоящиеся семена, где хромосомы в ином состоянии, чем в опытах с традесканцией или бобами. Наконец, в-четвертых, можно предполагать, что механизм действия излучений на хромосомы гороха сильно отличается от механизма их действия на хромосомы других изученных организмов. Первое предположение легко проверить, проанализировав характер поражений при разных дозах. В табл. 8 сравнивается среднее число мостиков и фрагментов на одну измененную клетку при воздействии сильных и слабых концентраций α- и β-излучателей.

Таблица 8

Влияние дозы и жесткости лучей на характер изменений в клетках

Концентрация излучателя (в мкюри/л)	Число клеток с мостиками	Число мостиков	Число мостиков на измененную клетку	Число клеток с фрагментами	Число фрагментов	Число фрагментов на измененную клетку
			β-излучатели			
0,25—0,5	88	139	1,58	7	8	1,14
1,0—2,0	159	320	2,01	42	61	1,45
			α-излучатели			
0,012—0,025	238	502	2,11	65	127	1,95
0,05 —0,1	391	929	2,37	191	372	1,95

Ознакомившись с приведенными данными, можно заметить, что в опытах с α-излучателями при повышении дозы облучения растет только число пораженных клеток, но не степень поражения отдельных клеток; это говорит за то, что в примененном интервале доз на ядро приходится в среднем меньше одного эффективного прохода α-частицы. Совершенно иная картина для β-частиц. Здесь с повышением дозы увеличивается степень поражения клеток, т. е. повышается среднее число эффективных проходов, в связи с чем первое предположение должно отпасть.

О правильности двух следующих предположений можно судить по результатам опытов с γ-облучением извне сухих и набухающих семян и проростков гороха [1]. В этих опытах, где материал облучался массивными дозами, на сухих семенах получилась экспоненциальная кривая зависимости эффекта от дозы, а на набухших семенах и проростках — S-образная. Этот интересный факт, заслуживающий специального изучения, разъясняет упомянутое кажущееся противоречие и дает возможность не прибегать к мало вероятному предположению об ином механизме действия излучений на хромосомы гороха, так как при облучении набухших семян и проростков горох дает ту же картину, что и другие объекты.

---

[1] Н. А. Порядкова, Н. В. Тимофеев-Ресовский, Н. В. Лучник. Проблема радиостимуляции растений. VI. Опыты по облучению семян гороха и пшеницы рентгеновскими и γ-лучами на разных стадиях замачивания и прорастания (см. настоящий сборник).

Сравнение эффективностей эквивалентных в физическом отношении концентраций α- и β-излучателей показывает, что α-частицы примерно в четыре раза эффективнее β-частиц, так как, например, для вызывания фрагментов в 10% клеток требуется 60 фэр α-излучения или 240 фэр β-излучения. В связи с тем, что как при α-, так и при β-облучении эффект вызывается одним проходом частицы, большая эффективность α-частиц может быть объяснена только тем, что большинство проходов β-частиц через ядро не вызывает в нем патологических изменений. Это понятно, если вспомнить, что ионизации распределены вдоль пути β-частицы неравномерно, а так как среднее расстояние между ионизациями сокращается с уменьшением скорости частицы, на небольшом участке в конце своего пути β-частица создает линейную плотность ионизации, сходную с создаваемой α-лучами. Ли (Lea, 1946) в своей теории хромосомных аберраций у традесканции развивает мысль, что при облучении рентгеновскими лучами разрывы создаются только густо ионизирующими «хвостами» вторичных электронов. Мы думаем, что подобное объяснение применимо и к нашим опытам по замачиванию семян гороха в растворах β-излучателей.

Что же касается стимуляции клеточного деления, то этот процесс гораздо труднее поддается биофизическому анализу как из-за меньшей изученности, так и в связи с его значительной изменчивостью. Выше удалось экспериментально показать, что стимуляция клеточного деления, наблюдаемая в наших опытах, является истинной, так как повышение митотической активности действительно объясняется повышением темпа клеточного деления. Мы смогли также убедиться в том, что это ускорение не является компенсаторным и что в основе его лежит не действие «некрогормонов», являющихся продуктами распада гибнущих клеток. Тем не менее вопросы о причине повышения скорости митоза и о характере лежащих в его основе первичных физических процессов остаются пока открытыми, и по этому поводу можно высказать только некоторые более или менее вероятные предположения.

Биофизический анализ процесса радиостимуляции значительно упрощается благодаря следующему обстоятельству. Кривая зависимости митотической активности от дозы облучения имеет максимум около 0,5 мкюри/л, а при 5 мкюри/л процент делящихся клеток уже не отличается от нормы. Процент клеток, имеющих патологические изменения, держится в этом интервале концентраций примерно на одном уровне; так, при концентрации 0,25 мкюри/л он равен 13,3, а при 5 мкюри/л — 14,7. Поэтому можно думать, что патологические митозы и связанная с ними задержка клеточного деления и гибель клеток при всех этих дозах одинаково влияют на степень радиостимуляции. В этой связи кривую зависимости митотической активности от концентрации β-излучателей можно рассматривать в первом приближении как простую кривую (для других излучателей и условий облучения это может и не иметь места). Общий характер этой кривой напоминает распределение Пуассона для m порядка одного-двух. Очевидно, для стимуляции митоза нужна какая-то оптимальная энергия; бóльшая энергия этого эффекта не вызывает. Здесь напрашивается аналогия между радиостимуляцией и торможением митоза. Грей и сотрудники (Gray, Mottram. Read a. Spear, 1940) выяснили, что для задержки митоза необходима абсорбция энергии, и притом довольно большой в объеме, имеющем порядок величины ядрышка. Интересно, что и в отношении задержки митоза α-частицы оказываются значительно менее эффективными, чем быстрые электроны. Поэтому мы предполагаем, что в основе радиостимуляции митоза и задержки клеточного деления лежат одни и те же внутриклеточные изменения, причем конечный результат зависит только от степени этих

изменений. Подтверждение этой гипотезы означало бы, что процесс радиостимуляции связан с действием на ядрышко, а следовательно, на обмен нуклеиновых кислот, роль которых в клеточном делении общеизвестна. Такое предположение кажется весьма вероятным и находится в соответствии с наблюдавшимся нами фактом измененной базофилии ядра и цитоплазмы в клетках облученных растений.

Описанные выше опыты, конечно, не решают вопроса о механизме радиостимуляции. Если мы говорим, что стимуляция роста и развития связана в значительной мере с активизацией клеточного деления, то возникает вопрос: а каков механизм стимуляции клеточного деления? Трудность прежде всего в том, что мы не знаем причин деления клетки не только при радиостимуляции, но и в нормальных условиях. Теорий существует много, но ни одна из них не является общепризнанной и здесь нет надобности их перечислять. Однако при таком положении вещей изучение стимуляции клеточного деления при облучении оказывается особенно интересным, так как выяснение этого процесса может пролить некоторый свет на механизм клеточного деления.

ВЫВОДЫ

1. В работе излагаются результаты цитологического исследования стимулированных и угнетенных облучением растений и делается попытка анализа явлений радиостимуляции.

2. При замачивании семян гороха в растворе β-излучателей, оказывающем стимулирующее действие на рост растений, наблюдается сильное повышение процента делящихся клеток при почти полном отсутствии патологических митозов. При замачивании семян в эквивалентных по физической дозе концентрациях α-излучателей, оказывающих на рост угнетающее действие, изменения процента митозов не наблюдается, но значительное число митозов имеет патологические отклонения.

3. Анализ полученных данных показывает, что общий эффект облучения на рост растений складывается из двух процессов: действия на митоз, являющегося при низких дозах стимулирующим, и возникновения хромосомных разрывов, часто ведущих к гибели клеток.

4. При замачивании семян гороха в растворах радиоактивных веществ разрывы хромосом происходят в результате прохода одной ионизирующей частицы, причем для разрыва необходимо несколько ионизаций.

5. Высказывается предположение, что стимуляция митоза связана с изменениями в обмене нуклеиновых кислот.

ЛИТЕРАТУРА

Атабекова А. И. Действие рентгеновых лучей на семена и проростки гороха. Биол. журн., 1936, т. 5.

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

Власюк П. А. Действие ядерных излучений на растения. Сессия АН СССР по мирному использованию атомной энергии. Заседания отделения биологических наук. М., Изд-во АН СССР, 1955.

Жежель Н. Г. Влияние естественных радиоактивных веществ на урожайность сельскохозяйственных растений. Сессия АН СССР по мирному использованию атомной энергии. Заседания отделения биологических наук. М., Изд-во АН СССР, 1955.

Заварзин А. А. и Стрелин П. С. Рентгенологические опыты над гидрами. Вестн. рентг. рад., 1928, т. 6.

Левитский Г. А. Морфология хромозом. Тр. по прикладной ботанике, генетике и селекции. Л., 1931, т. 27.

Лучник Н. В. Об аномальной реакции при малых дозах облучения. Биофизика, 1957, т. 2, № 1.

Сокурова Е. Н. Действие различных типов ионизирующих излучений на азотфиксирующие бактерии и микрофлору почвы. Автореферат диссертации. Ин-т микробиол. АН СССР. М., 1956.
Тимофеев-Ресовский Н. В., Порядкова Н. А., Макаров Н. М. и Преображенская Е. И. Проблема радиостимуляции растений. О действии слабых доз ионизирующих излучений на рост и развитие растений. Тр. Ин-та биол. УФАН СССР, вып. 9. Сб. работ Лаб. биофизики, № 1, Свердловск, 1957.
Bauer H. Die wachsenden Oozytenkerne einiger Insekten in ihrem Verhalten zur Nuklealfärbung. Z. f. Zellforschung, 1933, Bd. 18, S. 254.
Brachet J. Recherches sur le comportement de l'acide thymonucléique au cours de l'ovegenese. Archives de Biol., 1929, vol. 39.
Darlington C. D. a. La Cour L. F. The handling of chromosomes. London, 1942.
Gelin O. E. V. The cytological effect of different seed-treatments in X-rayed barley. Hereditas, 1941, vol. 27, p. 209.
Gray L. H., Mottram J. C., Read J. a. Spear F. G. Biological effects of fast neutrons. Brit. J. Radiol., 1940, vol. 13, p. 371.
Gray L. H. a. Scholes M. Effect of ionising radiations on boead been roots. Brit. J. Radiol., 1951.
Haberlandt G. Wundhormone des Erreger von Zellteilungen. Beiträge zur Allgem. Botanik, 1921, Bd. 2.
Kotval J. P. a. Gray L. H. Structural changes produced in microspores of Tradescantia by α-radiation. J. Genetics, 1947, vol. 48, p. 135.
Lea D. E. Actions of radiations on living cell. CUP, 1946.
Pekarek J. Wirkung von Röntgenstrahlen auf Kern- und Zellteilung. Planta, 1927, Bd. 4, S. 299.
Smith L. The acetocarmine smear technic. Stain Technol., 1947, vol. 22, p. 17.
Timofeeff-Ressovsky N. W. u. Zimmer K. G., Biophysik. Bd. I. Hirzel, Leipzig, 1947.

АКАДЕМИЯ НАУК СССР
УРАЛЬСКИЙ ФИЛИАЛ

Вып. 12 ТРУДЫ ИНСТИТУТА БИОЛОГИИ 1960

Н. А. ПОРЯДКОВА, Н. В. ТИМОФЕЕВ-РЕСОВСКИЙ и Н. В. ЛУЧНИК

ПРОБЛЕМА РАДИОСТИМУЛЯЦИИ РАСТЕНИЙ

VI. ОПЫТЫ ПО ОБЛУЧЕНИЮ СЕМЯН ГОРОХА И ПШЕНИЦЫ РЕНТГЕНОВСКИМИ И γ-ЛУЧАМИ НА РАЗНЫХ СТАДИЯХ ЗАМАЧИВАНИЯ И ПРОРАСТАНИЯ

ВВЕДЕНИЕ

Общеизвестно, что ионизирующие излучения различного типа с повышением применяемой дозы оказывают на живые организмы все более и более угнетающее действие. При этом летальная доза для различных организмов может сильно варьировать в зависимости от условий воздействия, стадии развития организма и типа излучения. Громадный материал, накопленный радиобиологией за последние десятилетия, в основном сводится к изучению этих вредных эффектов, их зависимости от характера облучения и установлению летальных и толерантных доз тех или иных излучений для различных организмов. Меньшее внимание уделялось возможным физиологическим воздействиям сравнительно малых доз тех же излучений, не вызывающих резких изменений в живых объектах, (а потому удобных для эксперимента). Уже давно было обнаружено, что сравнительно малые дозы ионизирующих излучений могут оказывать стимулирующее действие на организм. Некоторые из подобных указаний не основаны на достаточно солидном экспериментальном материале; однако в литературе, особенно в отечественной, описан ряд опытов, весьма тщательно проведенных на некоторых культурных растениях (горох и зерновые злаки), с несомненностью указывающих на повышение роста, развития, урожая растений, подвергавшихся на ранних стадиях развития (семя, проростки) воздействию слабых доз рентгеновских лучей (Атабекова, 1936, 1937 и 1938; Бреславец и др., 1935а, 1935б; Чехов, 1932). В упомянутых работах в вегетационных и полевых опытах изучалась общая «стимуляция» растений, проявлявшаяся в увеличении общей биомассы и повышении урожая зерна. Кроме того, на ряде растений и животных после общего или местного применения рентгеновских лучей в нелетальных дозах наблюдались случаи стимуляции клеточного деления, ускоренного роста той или иной ткани или органа или даже повышения темпов процесса дифференцировки (Brunst, 1952).

Исходя из упомянутых литературных данных, а также некоторых изложенных нами ранее теоретических соображений (Тимофеев-Ресовский,

Порядкова, Макаров, Преображенская, 1957), мы приступили в последние годы к изучению воздействия слабых доз ионизирующих излучений на ряд культурных растений методом замачивания семян в растворах излучателей. При этом мы воздействуем в первую очередь на набухающее и прорастающее семя; однако ввиду накопления в нем небольшого количества излучателей (которое с ростом растения соответственно «разбавляется») растение в течение всей жизни подвергается чрезвычайно слабому и все уменьшающемуся воздействию радиации. Данный метод обеспечивает в зависимости от концентрации используемого раствора либо некоторую стимуляцию роста растений и урожая, либо, при соответствующем повышении дозы облучения, ту или иную степень подавления и угнетения развития растений.

В этой связи возникает необходимость подробного анализа стимулирующих [1] и подавляющих [2] воздействий излучений на живые объекты, в частности на организм растений. Это нужно как с практической точки зрения, для выработки новых способов стимуляции и яровизации культурных растений, применимых в производстве, так и из теоретических соображений — для дальнейшего развития и углубления общих представлений о механизме биологического действия ионизирующей радиации, позволяющих понять всю сложную систему коррелятивно связанных реакций организма на излучения. У растений, построенных по сравнению с животными более просто, удалось обнаружить явную зависимость общего подавления развития растений и цитологических эффектов от дозы: во всех соответствующих опытах наблюдается хороший параллелизм между общим состоянием растений и возрастающим с дозой процентом ядерных аномалий, ведущих к гибели дочерних клеток (Тимофеев-Ресовский, Порядкова, Макаров, Преображенская, 1957).

В наших основных опытах цитологический анализ позволил обнаружить весьма интересный параллелизм между возрастающим с дозой процентом клеточных аномалий и степенью угнетения растений, с одной стороны, и повышением клеточных делений и стимуляцией растений при весьма слабых дозах,— с другой.

При замачивании семян в растворах излучателей набухающее и прорастающее семя облучается в большей или меньшей степени в зависимости от концентрации раствора и продолжительности замачивания; кроме того, имеет место постоянное, но все уменьшающееся воздействие радиации на все последующие стадии развития. В связи с этим трудно точно определить дозу, получаемую растением, и выяснить относительное значение воздействий на разные стадии его развития.

Подобные трудности, естественно, отпадают при облучении семян извне, что позволяет применять точную дозиметрию и ограничивать воздействие лучей во времени. Нами намечено проведение целой серии специальных опытов этого рода, из которой первыми являются опыты по воздействию рентгеновских и γ-лучей на разные стадии и фазы развивающихся семян дозами, сообщаемыми с разной мощностью.

Весьма вероятно, что при этом облучение семени и проростка в различных стадиях и фазах развития имеет далеко не одинаковое значение для достижения определенного конечного эффекта. Поэтому возникают дальнейшие вопросы: об относительном значении «фактора времени» (в обычном понимании), об относительной чувствительности покоящe-

---

[1] Н. В. Лучник. Проблема радиостимуляции растений. V. Цитологический анализ явления радиостимуляции (см. настоящий сборник).

[2] Н. В. Лучник. Лучевые поражения и воздействие на них. VI. Действие дрожжевых экстрактов на смертность облученных мышей и на проростки гороха (см. настоящий сборник).

гося, набухшего и проросшего семени и, наконец, более детально, об относительной радиочувствительности различных фаз набухания семян. При всем этом небезынтересно сравнивать, как стимулирующее действие слабых, так и подавляющее — сильных доз.

С целью выяснения намеченных выше вопросов нами поставлен ряд опытов, которые и описываются в настоящем сообщении.

МАТЕРИАЛ И МЕТОДИКА

Были проведены два типа опытов: с облучением рентгеновскими лучами и с облучением γ-лучами Co^{60}. Материалом для опытов первого типа служили местные несортовые семена гороха с примесью пелюшки; для второго были взяты семена гороха сорта Капитал, также местного происхождения, и пшеница сорта Эритроспермум 841.

В первом опыте облучению были подвергнуты воздушно-сухие, набухшие (после 24 час. намачивания в воде) и прорастающие (с длиной корешка около 1 см) семена гороха. В пределах каждой из этих групп опыт ставился в шести вариантах: контрольном и с применением пяти различных доз. Сухие семена облучались дозами в 500, 1000, 5000, 10 000 и 20 000 *r*; набухшие и проросшие семена облучались дозами в 100, 250, 500, 1000 и 5000 *r*. Облучение производилось при напряжении 180 kV с фильтром в 2 мм алюминия; мощность облучения (100 *r* в 1 мин.) сохранялась постоянной, поэтому величина дозы варьировалась изменением времени экспозиции. Облучение семян производилось в чашках Петри, причем набухшие и проросшие семена покрывались влажной фильтровальной бумагой. Сухие семена сразу же после облучения замачивались в воде в течение 24 час., после чего выкладывались в чашки Петри для проращивания; набухшие семена также проращивались; сразу же после облучения проращивание производилось при комнатной температуре (около 20°С). Опыт был так поставлен, что все три группы семян оказались проросшими и готовыми к высаживанию в почву в один и тот же день. Проросшие семена были высажены на опытные делянки площадью в 1 кв. м в количестве 100 растений на делянку в трех повторностях. Так как опыт был поставлен в середине июня, растения были убраны в возрасте примерно 10 недель в стадии цветения.

Опыты с γ-лучами были поставлены в течение двух сезонов.

В первый сезон семена гороха сорта Капитал облучались на разных стадиях 27-часового замачивания их в воде. Для облучения были избраны две дозы: слабая в 250 *r* и сильная в 5000 *r*. Каждая доза давалась с разной экспозицией: 0,5; 6 и 24 часа. Опыт с каждой дозой состоял из 7 вариантов. Схема опыта следующая:

1. Контроль: замачивание в воде в течение 27 час.
2. 3 часа замачивания, затем облучение в течение 24 час. в воде («24»).
3. 3 часа замачивания, затем облучение в течение 6 час. в воде и продолжение намачивания до 27 час. («6—I»).
4. 21 час замачивания и 6 час. облучения в воде («6 — II»).
5. 3 часа замачивания, 0,5 часа облучения в воде и продолжение замачивания до 27 час. в воде («0,5 — I»).
6. 14,5 часа замачивания, 0,5 часа облучения в воде и продолжение замачивания до 27 час. («0,5 — II»).
7. 26,5 часа намачивания и 0,5 часа облучения в воде («0,5 — III»).

После 27-часового замачивания все семена проращивали обычным способом (при температуре около 20° С), а затем высаживали в почву по 80 штук на делянку площадью в 1 кв. м; каждая серия состояла из трех повторностей. Все семена были высажены во второй половине мая;

растения всех повторностей были доведены до состояния полной зрелости и убраны в начале сентября.

В следующий сезон было поставлено два опыта с γ-лучами — на горохе и пшенице. Семена гороха того же сорта, что и в предыдущем опыте, на разных стадиях 24-часового замачивания их в воде облучались сильной дозой в 5000 *r* и слабой дозой в 150 *r*; для пшеницы были избраны дозы в 6000 и 250 *r*. Облучение гороха и пшеницы осуществлялось как сильными, так и слабыми дозами по следующей схеме:

1. Продолжительное облучение малой интенсивности в течение всех 24 час. замачивания («24»).
2. Более интенсивное облучение в течение первых 6 час. замачивания («6 — I»).
3. Облучение такой же интенсивности в течение последних 6 час. замачивания («6 — II»).
4. Мощное облучение в течение первого получаса замачивания («0,5—I»).
5. Столь же мощное облучение в течение последнего получаса замачивания («0,5 — III»).

В контроле горох и пшеницу замачивали в течение 24 час. в водопроводной воде при той же температуре. После облучения и проращивания семена высевали на делянки площадью в 1 кв. м; горох высевали по 80 семян на делянку, а пшеницу по весу (по 20 *г* на делянку). Опыты были поставлены в пяти повторностях, т. е. по 30 делянок на каждую дозу одной из культур; контроль был высеян на двойном числе делянок. Варианты располагались на делянках в шахматном порядке.

В опыте с рентгеновскими лучами растения из всех вариантов были убраны в фазе цветения, а в опытах с γ-лучами — в состоянии полной зрелости.

Для цитологического исследования из каждого варианта всех опытов кончики корешков фиксировались в смеси Карнуа через 48, 72 и 96 час. после конца замачивания; из фиксированного материала методом мазков делались временные препараты зоны роста корешков. Перед изготовлением препаратов корешки тотально окрашивались ацетокармином или лакмоидом.

Кроме семян из основного опыта для цитологического анализа брали материал из специально поставленных дополнительных опытов. Методика замачивания и облучения была такой же, как и в основных опытах Облучение производилось во всех случаях с интенсивностью 24 *r* в минуту, причем доза в 2500 или 5000 *r* давалась целиком или фракционировано на разных стадиях замачивания семян.

Для специальных целей, помимо вышеописанных цитологических исследований, производились цитохимические пробы. При этом применялись реакции Фельгена (гидролиз 12 мин., окраска 60 мин.) и исследования в ультрафиолетовых лучах длиной 280—250 ммк (микроскоп МУФ-1, фильтры: газовый хлор + бром и жидкий сульфат кобальта и никеля, среда-глицерин). Фотографирование окрашенных препаратов производилось с апохроматом × 90 и фотоокуляром × 10 при помощи фотонасадки на репродукционные изоортохроматические пластинки; в ультрафиолетовых лучах снимки проиводились с кварцевофлюоритовой оптикой МУФ-1 на спектральные ультрафиолетовые пластинки.

РЕЗУЛЬТАТЫ ОПЫТОВ

В настоящей главе будут описаны раздельно опыты с рентгеновскими лучами на горохе и опыты с γ-лучами на горохе и пшенице, проводившиеся в течение двух сезонов. После этого будут приведены данные цитоло-

гического исследования материала из всех этих опытов, а также результаты некоторых специальных цитологических опытов, поставленных с целью экспериментального анализа влияния различных факторов на эффект облучения.

1. Опыты на горохе с рентгеновскими лучами

Ориентировочный опыт с применением рентгеновских лучей состоял из трех серий по шесть вариантов в каждой.

В первой серии воздушно-сухие семена были облучены дозами в 500, 1000, 5000, 10 000 и 20 000 *r*; шестым вариантом был необлученный контроль. Все семена после облучения проращивались в чашках Петри. На делянки в 1 кв. м было высажено по 100 проросших семян из каждого варианта. Даже самая сильная из апплицированных доз не оказала заметного влияния на прорастание; во всех вариантах, включая контроль, число проросших семян составляло около 90%, т. е. примерно соответствовало установленной ранее всхожести этого семенного материала. Что же касается всходов на делянках, то разные дозы облучения оказали на них различное влияние. В контроле и после воздействия дозами 500 и 1000 *r* уже через три дня наблюдались дружные всходы, причем в последующие дни в варианте с дозой 500 *r* была отмечена даже некоторая стимуляция роста. Облучение дозами 5000 и 10 000 *r* вызвало некоторое отставание, а самая высокая доза (20 000 *r*) сильно понизила всхожесть, причем первые всходы появились только на девятый день. В течение первых недель растения из двух последних вариантов заметно отставали в росте; растения из семян, облученных дозой 10 000 *r*, впоследствии догнали остальные, доза же 20 000 *r* вызвала угнетение, сохранившееся до конца опыта. Еще заметнее была разница в морфологии растений из разных вариантов. Молодые растения из последнего варианта отличались не только малой величиной, но и обилием ненормальностей в величине и форме листьев, в особенности же сильной альбинотической пятнистостью листьев. В несколько более слабой форме такая же пятнистость наблюдалась и после облучения семян дозами 5000 и 10 000 *r*, а также у отдельных растений при дозе 1000 *r*. В контроле и при облучении дозой 500 *r* это явление совершенно отсутствовало.

Зацветание в отдельных вариантах также протекало неодинаково; первые четыре дозы, в особенности наиболее слабые, вызвали зацветание на несколько дней раньше, чем в контроле, в то время как растения, облученные дозой 20 000 *r*, запоздали в зацветании. Поэтому при уборке, которая производилась во время максимума цветения контрольных растений, средние дозы (5000 и 10 000*r*) вызвали значительное превышение контроля в числе цветов на одно растение, в то время как при облучении слабыми дозами (500 и 1000 *r*) почти не наблюдалось разницы по сравнению с контролем, так как эти растения перешли уже максимум цветения. При уборке учитывался вес надземной массы, число стеблей и число цветов (табл. 1). На рис. 1 в верхнем ряду графически изображены отклонения этих трех признаков от контроля.

Заметное положительное отклонение веса надземной массы вызвала только доза 500 *r*, а доза 20 000 *r* обусловила столь же заметное отрицательное отклонение; по числу стеблей доза 500 *r* дала положительное, а дозы 10 000 и 20 000 *r* — отрицательное отклонение от контроля; число же цветов, как было сказано, отражает не столько действительную плодовитость растения, сколько различия в сроках зацветения.

Во второй серии опытов облучение набухших семян производилось дозами в 100, 250, 500, 1000 и 5000 *r*. Набухшие семена после облучения проращивались, а затем высаживались на делянки в 1 кв. м.

Таблица 1

Влияние облучения сухих семян разными дозами рентгеновских лучей на рост и развитие гороха (в пересчете на одно растение; в скобках — процент контроля)

Доза облучения (в *r*)	Число растений	Вес надземной массы (в г)	Число стеблей	Число цветов
Контроль	214	70	1,48	1,46
500	66	83	1,70	1,57
		(118)	(115)	(108)
1 000	75	76	1,47	1,44
		(108)	(99)	(97)
5 000	54	76	1,40	2,24
		(108)	(95)	(151)
10 000	70	76	1,21	1,91
		(108)	(81)	(130)
20 000	47	62	1,19	1,53
		(88)	(80)	(105)

На прорастание ни одна из доз не оказала заметного влияния. Дружные всходы появились в контроле и в вариантах с облучением дозами 100 и 250 *r* на четвертый и пятый дни. Такие дозы давали в течение ближайших недель некоторый стимуляционный эффект. Дозы 500 и 1000 *r* вызвали задержку появления всходов на несколько дней, а доза 5000 *r* резко снизила (до 8%) число взошедших растений. Три наиболее высокие дозы вызвали описанную выше альбинотическую крапчатость и пятнистость листьев, а при дозе 5000 *r* наблюдались нарушения нормальной формы листьев и стеблей. Крапчатость листьев совершенно не отмечалась при облучении дозой 500 *r* сухих семян, а при воздействии той же дозой на набухшие семена этот эффект был ясно выражен. Три более слабые дозы ускорили на несколько дней зацветание, тогда как высокие дозы, особенно 5000 *r*, его задержали.

При уборке учитывались те же признаки, что и в первой серии. Результаты уборки приведены в табл. 2. В среднем ряду рис. 1 графически изображены отклонения от контроля всех признаков растений, облученных разными дозами.

Таблица 2

Влияние облучения набухших семян разными дозами рентгеновских лучей на рост и развитие гороха (в пересчете на одно растение; в скобках — процент контроля)

Доза облучения (в *r*)	Число растений	Вес надземной массы (в *г*)	Число стеблей	Число цветов
Контроль	214	76	1,48	1,46
100	41	70	1,51	1,83
		(108)	(102)	(125)
250	82	81	1,63	1,90
		(116)	(110)	(130)
500	84	70	1,40	1,68
		(100)	(95)	(115)
1 000	88	63	1,26	1,33
		(90)	(85)	(91)
5 000	8	65	1,50	0,25
		(93)	(101)	(17)

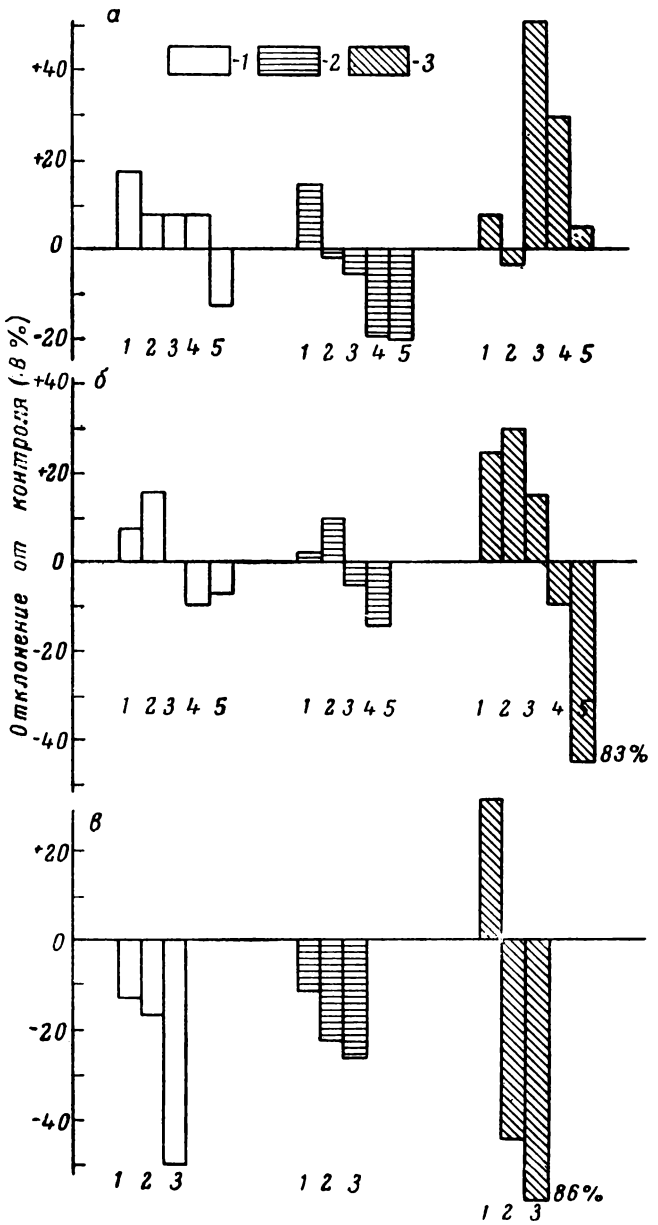


Рис. 1. Отклонение от контроля ряда признаков у растений гороха в фазе цветения при облучении разными дозами рентгеновских лучей сухих (*а*), набухших (*б*) и проросших (*в*) семян

Для сухих семян: *1* — 500 *г*; *2* — 1000 *г*; *3* — 5000 *г*; *4* — 10 000 *г*; *5* — 20 000 *г*; для набухших и проросших семян: *1* — 100 *г*; *2* — 250 *г*; *3* — 500 *г*; *4* — 1000 *г*; *5* — 5000 *г*; штриховка: *1* — вес надземной массы, *2* — число стеблей, *3* — число цветков

Вес надземной массы в первых двух вариантах дал небольшое положительное, а в двух последних — отрицательное отклонение от контроля; по числу стеблей второй вариант дал небольшое положительное, а четвертый — отрицательное отклонение; по числу цветков в первых трех вариантах наблюдалось заметное положительное, в пятом же очень выраженное (— 83%) отрицательное отклонение от контроля.

Проросшие семена облучались так же и теми же дозами, как и набухшие, и сразу же высаживались на делянки в 1 кв. м. В контроле и при облучении наименьшей дозой (100 *r*) были получены нормальные всходы, в то время как дозы 250 и особенно 500 *r* вызвали некоторое подавление всхожести. Семена, облученные дозами 1000 и 5000 *r*, совсем не дали всходов, из них не было получено ни одного растения. В первых вариантах всхожесть количественно не отличалась от контроля. При дозе 500 *r* она снизилась до 57%; в этом варианте наблюдались также морфологические ненормальности и заметная пятнистость листьев. В дальнейшем растения этого варианта сильно отстали от контроля. Однако и растения, выросшие из семян, облученных дозами 100 и 250 *r*, также до самой уборки не догнали контрольные растения. Лишь в первом варианте цветение началось несколько раньше, чем в контроле. При облучении более высокими дозами цветение несколько запоздало и было менее обильно, чем в контроле. Результаты уборки приведены в табл. 3. В нижнем ряду рис. 1 графически изображены отклонения данных признаков от контроля. Из таблицы и особенно из рисунка ясно видно, что только число цветов в первом

Таблица 3

Влияние облучения проросших семян разными дозами рентгеновских лучей на рост и развитие гороха (в пересчете на одно растение; в скобках — процент контроля)

Доза облучения (*r*)	Число растений	Вес надземной массы (в г)	Число стеблей	Число цветов
Контроль	214	70	1,48	1,46
100	89	61	1,31	1,93
		(87)	(88)	(132)
250	86	58	1,16	0,82
		(83)	(78)	(56)
500	57	35	1,10	0,21
		(50)	(74)	(14)
1 000	0	—	—	—
5 000	0	—	—	—

варианте превышало контроль, по всем же остальным признакам наблюдалось заметное, а в третьем варианте весьма сильное отрицательное отклонение от контроля.

Сравнивая результаты, полученные во всех трех сериях опыта, приходим к следующему заключению. При облучении сухих семян первая доза (500 *r*) вызвала, по-видимому, небольшой положительный эффект, что соответствует полученным в свое время на горохе же результатам (Атабекова, 1936); пятая доза 20 000 *r* вызывает сильное угнетение, в то время как 10 000 *r* угнетает сравнительно слабо.

Иная картина получилась при облучении проросших семян: четвертая и пятая дозы (1000 и 5000 *r*) оказались абсолютно летальными (в результате облучения ими не было получено ни одного жизнеспособного растения); третья доза (500 *r*) по степени угнетения заметно превышает

гораздо более сильную пятую дозу (20 000 *r*) в опытах с сухими семенами; однако и при облучении первыми двумя дозами наблюдалось хотя и слабое, но все же заметное угнетение и не было обнаружено никакого намека на стимуляцию.

Опыты по облучению набухших семян занимают промежуточное положение: пятая доза не оказалась летальной, хотя и обусловила весьма сильное снижение всхожести; четвертая и особенно пятая дозы заметно угнетали растения; облученные же третьей дозой растения практически не отличались от контроля, а две первые дозы дали небольшую, но, по-видимому, реальную стимуляцию, что опять-таки соответствует данным А. И. Атабековой. Общий результат можно сформулировать следующим образом: набухшие семена являются минимум в четыре-пять раз менее резистентными к облучению рентгеновскими лучами, чем сухие, причем те и другие характерно реагируют легкой стимуляцией развития на слабые дозы и заметным ускорением зацветания на значительную часть диапазона нелетальных доз; проросшие же семена значительно менее резистентны к радиации; даже на дозу в 100 *r* они не реагируют стимуляцией развития и лишь при этой самой слабой дозе облучения дают некоторое ускорение зацветания.

2. Опыты с γ-лучами

Основываясь на данных описанного выше опыта, мы провели в течение двух сезонов опыты по облучению набухающих семян гороха и пшеницы γ-лучами кобальта по схеме, приведенной в разделе «Материал и методика». Эти опыты преследовали две основные цели: во-первых, установление колебаний чувствительности семян к облучению в разные фазы их набухания и, во-вторых, если подобная разница будет обнаружена, сравнение в этом направлении действия слабой и сильной доз (250 и 5000 *r*).

Кроме того, так как, помимо облучения разных фаз, в обеих сериях производилось протрагированное облучение семян, в течение 24 час. замачивания, а наиболее короткое облучение теми же дозами (0,5 часа) было в 48 раз концентрированнее, то представлялась возможность выяснить значение и так называемого фактора времени.

Опыты первого сезона на горохе. В первой серии опытов была выбрана доза γ-лучей в 5000 *r*, которая должна оказывать угнетающее влияние на растения. Семена гороха облучались этой дозой в отдельных вариантах так: в течение 24 час., на протяжении 6 час. в начале или в конце замачивания и, наконец, в продолжение 0,5 часа в начале, середине или в конце замачивания. После 27-часового замачивания семена проращивались обычным способом, после чего их высаживали на делянку в 1 кв. м по 80 семян. Эта серия состояла из трех повторностей; все растения были убраны одновременно в состоянии полной зрелости. Все подопытные растения в первые недели несколько отставали от контрольных, причем особенно заметно отставали растения в вариантах «24», «6—II» и «0,5—III»; в двух последних случаях наблюдалось и некоторое понижение процента всхожести. Растения из всех вариантов в фазе всходов имели листья с упоминавшейся уже ранее пятнистостью, выраженной в разной степени. Срок зацветания не отличался заметно от контроля, но цветение было менее обильно и дружно в вариантах «24», «6—II» и «0,5—III». Результаты уборки, при которой учитывались вес надземной массы, вес зерна и отношение веса зерна к весу надземной массы, приведены в табл. 4. На рис. 2, в верхней его части, графически изображены процентные отклонения от контроля признаков из всех вариантов.

Таблица 4

Влияние фактора времени и стадии набухания семян гороха на эффект γ-облучения в дозе 5000 *r* (результаты уборки урожая в пересчете на одно растение; в скобках — процент контроля). Опыты первого сезона

Вариант * опыта	Число растений	Вес зерна (в г)	Вес надземной массы (в г)	Отношение веса зерна к весу надземной массы
Контроль	163	5,64	7,85	0,72
„24“	171	4,34	10,50	0,41
		(77)	(134)	(57)
„6—I“	163	6,28	8,46	0,74
		(111)	(108)	(103)
„6—II“	121	4,53	14,35	0,32
		(80)	(183)	(44)
„0,5—I“	178	5,93	7,79	0,70
		(105)	(99)	(97)
„0,5—II“	170	5,46	8,16	0,67
		(97)	(104)	(93)
„0,5—III“	135	5,08	11,27	0,45
		(90)	(144)	(62)

* Варианты опыта в таблицах и рисунках и тексте обозначены: „24“ — семена облучались 24 часа во время замачивания их в воде, „6—I“ — облучались 6 час. в начале замачивания, „6—II“— облучались 6 час. в конце замачивания, „0,5 — I“—облучались 0,5 часа в начале замачивания, „0,5 — II“— облучались 0,5 часа в середине замачивания и „0,5 — III“ — облучались 0,5 часа в конце замачивания.

Как видно из таблицы и рисунка, характерно заметное повышение веса надземной массы и одновременное снижение веса семян; в связи с этим отношение веса семян к весу надземной массы сильно понижено по сравнению с контролем. Особенно выражено это в вариантах «24», «6—II» и «0,5—III», давших наиболее сильное отрицательное отклонение как по весу семян, так и по отношению веса зерна к весу надземной массы. Остальные варианты («6—I», «0,5—I» и «0,5—II») по весу семян и надземной массы, а также по отношению этих весов вряд ли реально отличаются от контроля. Итак, наиболее чувствительна последняя фаза замачивания (варианты «6—II» и «0,5—III»); особенно же интересно то, что максимальное угнетение наблюдалось в варианте «24», в котором только незначительная часть дозы пала на чувствительную последнюю фазу набухания, а самая доза была дана в наименее концентрированной форме. Это следует особенно отметить в связи с тем, что в большинстве изучаемых реакций эффект растет с увеличением концентрации дозы (Griffith, Zimmer, 1935), здесь же мы встречаемся с обратной зависимостью. Как будет видно из дальнейшего, это не случайное наблюдение.

Вторая серия опытов была совершенно аналогична первой, с той лишь разницей, что семена облучались не сильной дозой в 5000 *r*, а слабой в 250 *r*. Наблюдения за всходами показали, что отставание всхожести в опытных вариантах отсутствует, даже в некоторых вариантах, в особенности «24», всходы были несколько дружнее и появлялись раньше, чем в контроле. Никаких морфологических отклонений от контроля у растений из всех вариантов также не наблюдалось. Цветение во всех вариантах протекало дружно и в вариантах «24» и «6—II» несколько опередило контроль. Уборка производилась одновременно с уборкой растений первой серии, в состоянии полной зрелости. Результаты уборки при-

ведены в табл. 5, а на рис. 2, в нижней его части, графически изображены отклонения признаков всех вариантов от контроля.

Из таблицы и рисунка видно, что в отличие от первой серии почти по всем признакам опытные варианты превосходят контроль. Если в опытах первой серии были обнаружены отклонения только по весу надземной

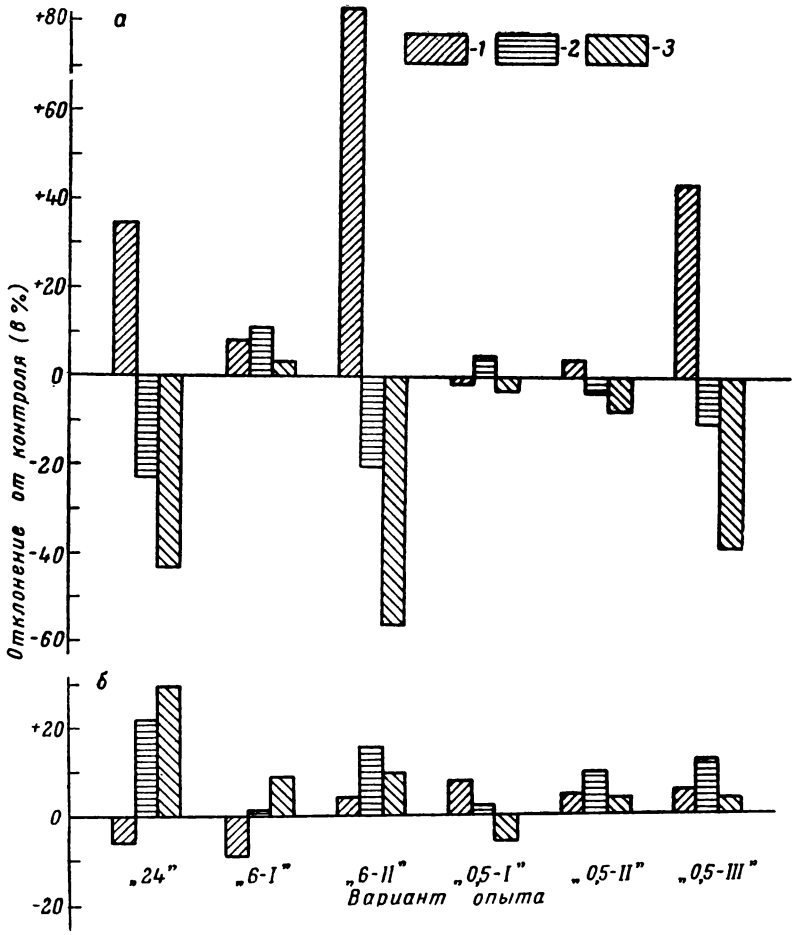


Рис. 2. Отклонение от контроля ряда признаков у растений гороха в разных вариантах опыта первого сезона при дозе γ-облучения:

а — 5000 *г*; *б* — 250 *г*; *1* — вес солом — вес зерна, *3* — отношение веса зерна к весу надземной массы

Объяснения в тексте

массы облученных растений и притом особенно в вариантах «24», «6—II» и «0,5—III», давших наиболее заметное понижение урожая семян, то во второй серии именно эти варианты реально превосходили контроль по урожаю зерна. Вариант «24», давший наивысший урожай зерна, в то же время уступал контролю по весу надземной массы. Из рис. 2 ясно видно, что варианты «24» в первой и второй сериях дали диаметрально противоположную картину по весу зерна, надземной массы и по отношению этих весов. Следовательно, мы и в этой серии получили в основном ту же картину, что и в первой, т. е. большую чувствительность семян к облучению на последних фазах набухания и обратную зависимость эффекта от фактора времени; только результат этот сопровождается противоположным знаком: в тех вариантах, которые в первой серии дали наибольшее пода-

Таблица 5

Влияние фактора времени и стадии набухания семян гороха на эффект облучения слабой дозой γ-лучей, 250 *r* (результаты уборки урожая в пересчете на одно растение; в скобках — процент контроля). Опыты первого сезона

Вариант опыта	Число растений	Вес зерна (в г)	Вес надземной массы (в г)	Отношение веса зерна к весу надземной массы
Контроль	160	5,89	7,52	0,78
„24“	177	7,15	7,06	1,01
		(122)	(94)	(130)
„6—I“	189	5,93	6,85	0,87
		(101)	(91)	(109)
„6—II“	156	6,85	7,83	0,88
		(116)	(104)	(110)
„0,5—I“	159	5,99	8,15	0,73
		(102)	(108)	(94)
„0,5—II“	171	6,52	7,92	0,82
		(110)	(105)	(104)
„0,5—III“	164	6,65	7,96	0,82
		(113)	(106)	(104)

вление урожая зерна, здесь обнаруживается стимулирующее действие радиации.

Опыты второго сезона на горохе. Ввиду интересных результатов, полученных в первом сезоне, на следующий год опыт был повторен в большем масштабе и с некоторым упрощением схемы (были опущены варианты «0,5—II» и трехчасовое замачивание перед началом облучения).

Семена гороха облучались на разных стадиях 24-часового замачивания в водопроводной воде («24», «6—I», «6—II», «0,5—I» и «0,5—III») сильной (5000 *r*) или слабой (150 *r*) дозой γ-лучей.

Заметные различия между вариантами по всхожести отсутствовали; контрольные растения, особенно облученные слабой дозой, взошли несколько дружнее и раньше растений, облученных сильной дозой. По мере роста растений можно было, однако, наблюдать некоторое отставание вариантов «24», «6—II» и «0,5—III» сильной дозы; первые молодые листочки в этих вариантах отличались, правда в незначительной степени, типичной для радиопоражения растений альбинотической пятнистостью, которая по мере роста растений становилась все менее заметной. Наиболее ясная разница между вариантами наблюдалась к началу цветения; особенно дружно зацветали растения, облученные слабой дозой, затем контрольные, а растения, получившие сильную дозу, заметно отставали. Если в контроле в первый день цветения в среднем на одно растение приходилось 24 цветка, то в вариантах «24», «6—I», «6—II», «0,5—I» и «0,5—III» с сильной дозой было в то же время соответственно 1; 7; 0; 12 и 6 цветков, а в тех же вариантах со слабой дозой — 39, 26, 30, 30, 38 цветков. К концу вегетации не было заметных на глаз различий между отдельными вариантами по общему количеству надземной массы, но наблюдалось некоторое отставание в созревании растений, облученных сильной дозой; уборка же на всех делянках была произведена одновременно после полного созревания растений во всех вариантах.

В табл. 6 приведены результаты уборки гороха, облученного сильной дозой (5000 *r*); по контролю учтено десять, а по всем прочим вариантам по пять повторностей.

Таблица 6

Влияние фактора времени и стадии набухания семян гороха на эффект облучения сильной дозой γ-лучей (500 *r*) (результаты уборки урожая; в скобках — процент контроля). Опыты второго сезона

Вариант опыта	Всего растений	На 1 делянку			На 1 растение		
		число растений	вес соломы (в г)	вес зерна (в г)	вес соломы в (г)	вес зерна (в г)	вес зерна (в % от общего веса)
Контроль	726	73	400	193	5,48	2,64	32,5
„24"	360	72	412	150	5,70	2,08	26,7
			(103)	(78)	(104)	(79)	(82)
„6—I"	342	68	416	161	6,13	2,46	28,6
			(104)	(87)	(112)	(93)	(88)
„6—II"	314	63	407	149	6,57	2,26	25,6
			(102)	(77)	(120)	(86)	(79)
„0,5—I"	324	65	381	163	5,86	2,51	30,0
			(95)	(84)	(107)	(91)	(92)
„0,5—III"	304	61	363	128	5,95	2,01	25,0
			(91)	(66)	(108)	(76)	(77)

Из таблицы видно, что по весу зерна на одно растение явно выраженное сильное подавление (79, 86 и 70% от контроля) обнаруживается в вариантах «24», «6—II» и «0,5—III», а особенно в первом и последнем; в вариантах «6—I» и «0,5—I» наблюдалось лишь слабое снижение урожая (93—95% от контроля). При этом вес вегетативной массы не только не снизился по сравнению с контролем, но наблюдалось даже некоторое увеличение его. Абсолютные значения признаков и отклонений по отдельным вариантам несколько отличаются от таковых из соответствующего опыта прошлого года, однако общая закономерность сохраняется совершенно неизменной: наиболее выраженное подавление наблюдалось в вариантах «24», «6—II» и «0,5—III».

Таблица 7

Влияние фактора времени и стадии набухания семян гороха на эффект облучения слабой дозой γ-лучей (150 *r*) (результаты уборки урожая; в скобках—процент контроля). Опыты второго сезона

Вариант опыта	Всего растений	На 1 делянку			На 1 растение		
		число растений	вес соломы (в г)	вес зерна (в г)	вес соломы (в г)	вес зерна (в г)	вес зерна (в % от общего веса)
Контроль	726	73	400	193	5,48	2,64	32,5
„24"	300	60	408	238	6,80	3,97	36,9
			(102)	(123)	(124)	(150)	(113)
„6—I"	309	62	380	215	6,14	3,47	36,1
			(95)	(111)	(112)	(131)	(111)
„6—II"	310	62	396	228	6,40	3,68	36,5
			(99)	(118)	(117)	(139)	(112)
„0,5—I"	363	73	451	236	6,18	3,24	34,5
			(113)	(122)	(113)	(123)	(106)
„0,5—III"	320	64	427	230	6,68	3,60	35,0
			(107)	(119)	(122)	(136)	(108)

В табл. 7 приведены результаты уборки урожая в вариантах, облученных слабой дозой (150 *r*). Здесь все варианты дали по весу как зерна, так и вегетативной массы заметное положительное отклонение от контроля. И опять-таки, подобно опытам прошлого года, наибольший эффект показали те же варианты «24», «6—II» и «0,5—III».

На рис. 3 дано графическое изображение результатов всего опыта с горохом. На рисунке ясно виден тот же полный параллелизм между распределением по вариантам максимального отрицательного эффекта сильной и положительного эффекта слабой дозы. Как увидим далее, столь же ясно подтверждается параллелизм между вышеприведенными данными по урожаю растений и данными цитологического анализа. Тем самым подтверждаются два основных интересных явления, а именно: параллельное в отношении наиболее чувствительных к облучению стадий набухания семян подавляющее действие сильных и стимулирующее действие слабых доз излучения и своеобразный «обратный фактор времени», выражающийся в максимальной эффективности наиболее протрагированной дозы.

На рис. 4 сравниваются результаты опытов на горохе в течение двух сезонов; из рисунка ясно виден полный параллелизм данных, полученных во всех опытах.

Опыты на пшенице. Семена пшеницы были замочены и облучены по той же схеме, что и семена гороха. Все семена замачивались 24 часа в водопроводной воде (15—16° С) и облучались в отличие от гороха в дозах 6000 или 250 *r*. Семена (по 20 *г* на делянку в 1 кв. м) были высеяны в пяти повторностях сразу же после 24-часового замачивания и облучения в соответствующих дозах.

На большинстве делянок, засеянных сильно облученными семенами, визуальные наблюдения в течение вегетационного периода показали лишь некоторое понижение густоты стояния, небольшое запаздывание колошения и созревания. Уборка на всех делянках была произведена после полного созревания растений. В табл. 8 приведены результаты уборки вариантов сильной дозы. Собранный с каждой делянки сноп после просушки взвешивался, а затем обмолачивался и взвешивалось вымолоченное зерно: вес соломы определялся вычитанием веса зерна из об-

Таблица 8

Влияние фактора времени и стадии набухания семян пшеницы на эффект облучения сильной дозой γ-лучей (6000 *r*) (результаты уборки урожая; в скобках—процент контроля). Опыты второго сезона

Вариант опыта	Вес на 1 делянку (в г)		Вес зерна в % от общего веса	Абсолютный вес семян (в г)
	соломы	зерна		
Контроль	519	329	38,8	34,8
„24“	397	250	38,6	35,6
	77)	(76)	(100)	(102)
„6—I“	417	266	38,9	35,4
	(81)	(81)	(100)	(101)
„6—II“	335	192	36,4	36,5
	(65)	(58)	(94)	(105)
„0,5—I“	481	310	39,2	34,6
	(93)	(94)	(101)	(100)
„0,5—III“	282	170	37,4	36,4
	(55)	(52)	(96)	(105)

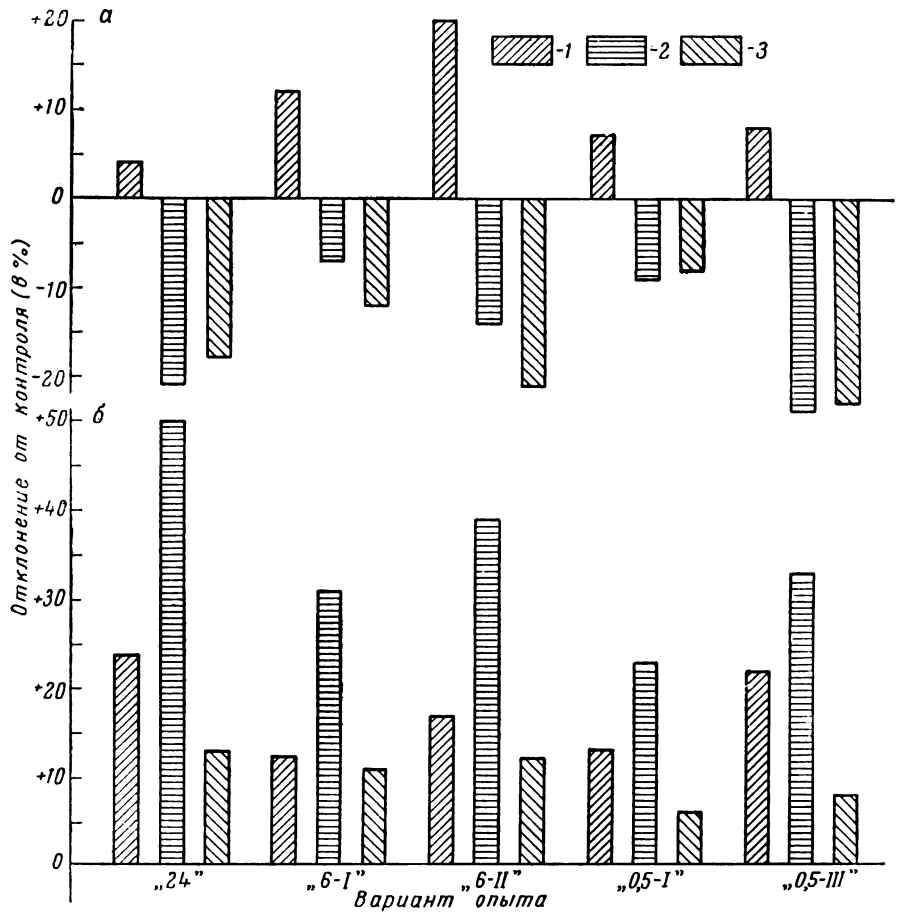


Рис. 3. Отклонение от контроля ряда признаков у растений гороха в разных вариантах опыта второго сезона при дозе γ-облучения:

а — 5000 *г*; *б* — 250; *1* — вес соломы, *2*— вес зерна, *3* — вес зерна в % от общего веса

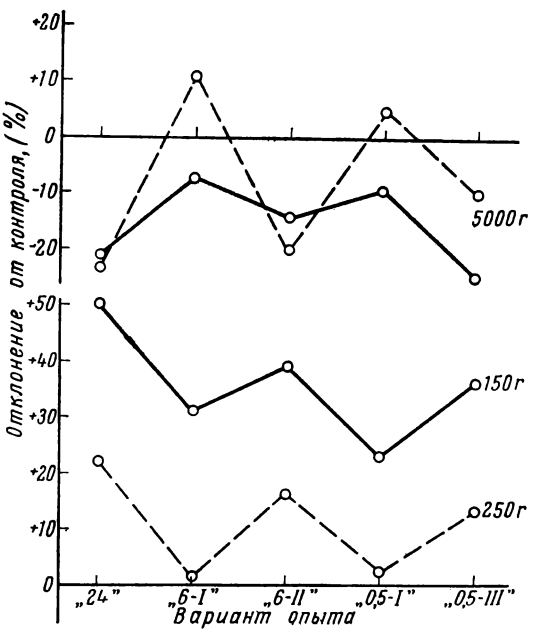


Рис. 4. Сравнение результатов двух опытов с γ-облучением гороха. Штриховые линии — опыты первого сезона, сплошные линии — опыты второго сезона

щего веса. Помимо этого, определялись отношение (в процентах) веса зерна к общему весу и абсолютный вес зерна. В таблице все данные приводятся в пересчете на одну делянку. Как видно из таблицы, по общему весу растений, весу соломы и зерна на делянку все варианты заметно уступали контролю; наибольшее понижение дали варианты «24», «6 — II» и, особенно сильное, «0,5—III», а наименьшее — вариант «0,5—I» (в котором семена облучались еще в не набухшем состоянии). Вес зерна в процентах от общего веса и абсолютный вес семян дали по вариантам лишь незначительные отклонения от контроля; по первому из этих признаков в вариантах «6—II» и «0,5—III» обнаружилось небольшое понижение, а по второму в этих же вариантах наблюдалось небольшое повышение. Упомянутое понижение процентного веса семян объясняется сильным угнетением генеративных органов растений, повышение же абсолютного веса в тех же вариантах объясняется, по-видимому, значительным понижением густоты стояния, а в связи с этим и повышением площади питания отдельных растений.

В табл. 9 приведены результаты уборки урожая пшеницы в вариантах, получивших слабую дозу γ-лучей (250 *r*). Здесь отклонения от контроля менее выражены, чем в вариантах сильной дозы. Однако те же варианты («24», «6—II» и «0,5—III») превосходят контроль по весу зерна, а вариант «24» также по весу соломы и общему весу. Вес зерна в процентах от общего веса дает положительное отклонение лишь в варианте «0,5—III», а абсолютный вес зерна — в вариантах «24» и «0,5—III».

Таблица 9

Влияние фактора времени и стадии набухания семян пшеницы на эффект облучения слабой дозой γ-лучей (250 *r*); результаты уборки урожая; (в скобках — процент контроля). Опыты второго сезона

Вариант опыта	Вес на 1 делянку (в *г*)		Вес зерна в % от общего веса	Абсолютный вес семян (в *г*)
	соломы	зерна		
Контроль	519	329	38,8	34,8
„24“	565	369	39,5	39,0
	(107)	(112)	(102)	(112)
„6—I“	505	322	38,7	35,9
	(97)	(98)	(100)	(103)
„6—II“	523	348	39,9	35,9
	(101)	(106)	(103)	(103)
„0,5—I“	489	316	39,0	34,2
	(95)	(96)	(101)	(98)
„0,5—III“	498	356	41,6	37,7
	(96)	(108)	(107)	(108)

Таким образом, результаты, полученные при уборке урожая пшеницы, в общем весьма сходны с таковыми, полученными на горохе; это особенно ясно видно из рис. 5, на котором графически изображены отклонения в процентах от контроля основных признаков по всем вариантам опыта (*а* — доза облучения 6000 *r*, *б* — доза облучения 250 *r*).

Так же, как и на рис. 3 для гороха, здесь особенно рельефно выступает параллелизм в отрицательном эффекте сильной и в положительном действии слабой дозы по тем же вариантам. Разница, однако, заключается в том, что вариант «24», особенно при сильной дозе, не является

наиболее эффективным в смысле угнетения; наиболее сильно действует вариант «0,5—III» сильной дозы. В общем особенно близкое сходство между горохом и пшеницей наблюдается по эффекту слабой дозы. Как увидим из дальнейшего, это имеет свое основание.

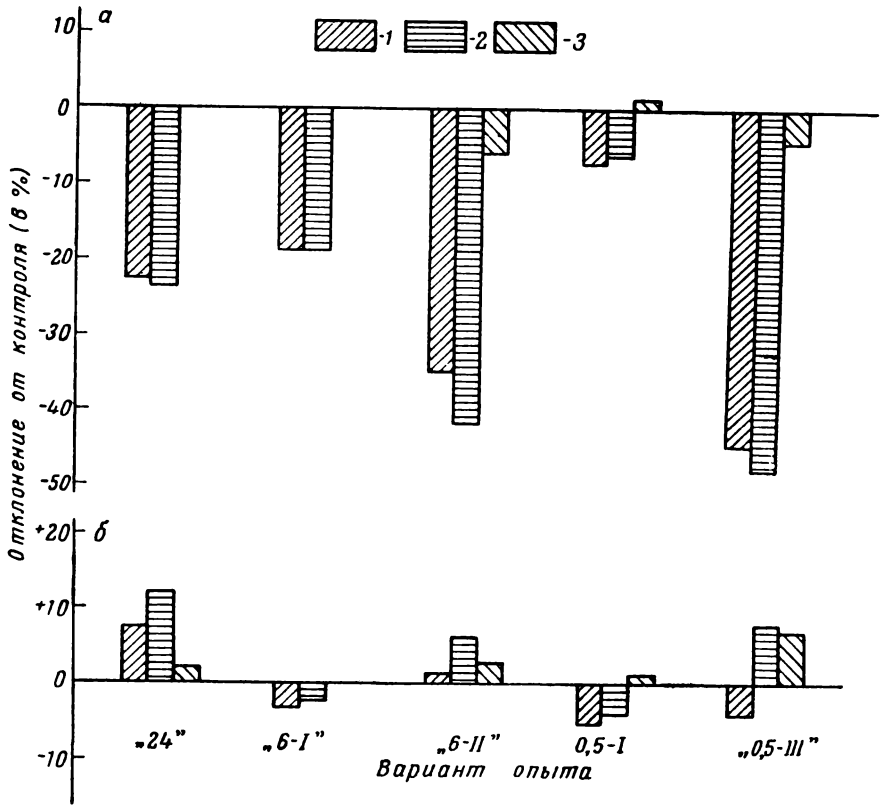


Рис. 5. Отклонение от контроля ряда признаков у растений пшеницы в разных вариантах опыта при дозе γ-облучения:

а — 6000 *r*; б — 250 *r*; *1* — вес соломы, *2* — вес зерна, *3* — вес зерна в % от общего веса

3. Цитологические данные

Все описанные выше опыты по облучению рентгеновскими и γ-лучами семян гороха и пшеницы сопровождались цитологическим контролем. При этом определялись митотическая активность, процент ненормальных анафаз и телофаз и характер наблюдаемых в них изменений через разное время после облучения. Так как митотическая активность во всех опытах не отличалась существенно от контроля, соответствующих данных мы не приводим. Процент ненормальных анафаз и телофаз почти совпадает, поэтому ниже рассматриваются только данные по анафазам.

Наряду с этим были поставлены также специальные опыты с целью дополнения и экспериментального анализа фактов, наблюдавшихся в основных опытах.

Данные основных опытов. Рассмотрим прежде всего результаты цитологических исследований в опытах по облучению гороха рентгеновскими лучами. Соответствующие данные приведены на рис. 6. На том же рисунке представлены результаты, полученные в аналогичных опытах при облучении сухих, набухших и проросших семян γ-лучами. Действие

рентгеновских и γ-лучей на сухие и проросшие семена совпадало, но в отношении абсолютной эффективности облучения была получена разница, хорошо соответствующая вышеописанным различиям в общебиологической радиочувствительности сухих и проросших семян. В соответствии с результатами описанного выше опыта набухшие семена и цитологически, по проценту ненормальных митозов, занимают промежуточное положение между сухими и проросшими. Однако, как видно из рисунка, действие на набухшие семена рентгеновских лучей оказалось заметно

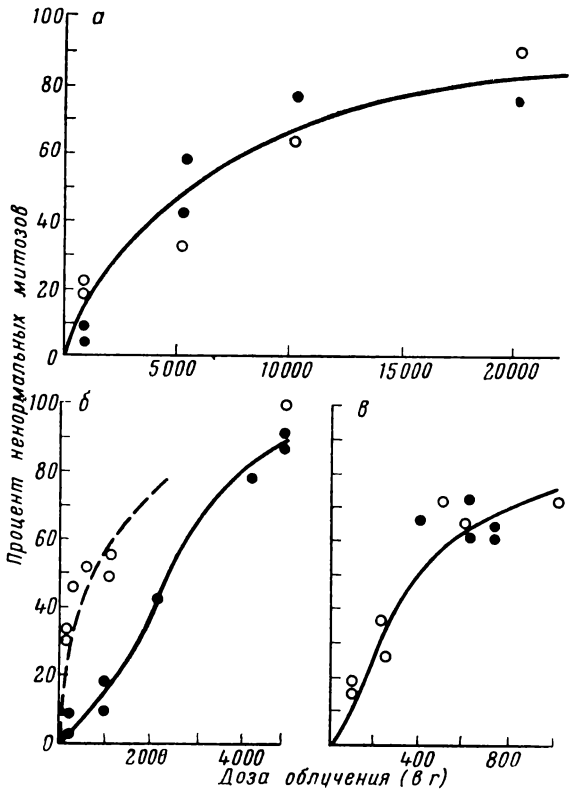


Рис. 6. Влияние разных доз рентгеновских (кружки) и γ-лучей (точки) на процент ненормальных митозов в меристематических клетках гороха при облучении:

а — сухих семян; *б* — набухших семян; *в* — проростков

более выраженным, чем γ-лучей. Следует обратить внимание и на форму кривых эффекта дозы. У большинства исследованных объектов зависимость числа цитологически ненормальных клеток от дозы рентгеновских лучей выражается S-образными кривыми (Lea, 1946; Timofeeff-Ressovsky, Zimmer, 1947). В рассматриваемых опытах такие же кривые получились при облучении набухших и проросших семян, однако облучение сухих семян дало линию, напоминающую кривую одного попадания. Сходные кривые наблюдаются и при замачивании семян в растворах радиоактивных веществ (Лучник, 1957). Это явление можно, как мы полагаем, объяснить тем, что в сухом семени хромосомы находятся в ином состоянии, чем в набухшем, в связи с чем становится невозможной их рекомбинация после разрывов, вызванных действием ионизирующей радиации. Несомненно, что это наблюдение тесно связано с известным фактом отсутствия фактора времени при облучении покоящихся семян.

Опыты по облучению γ-лучами семян гороха на разных стадиях набухания ставились, как было сказано, в течение двух лет и обе серии опытов сопровождались цитологическим контролем. В связи с этим необходимо выяснить, насколько результаты первого и второго года соответствуют друг другу, т. е. насколько постоянны подмеченные закономерности. В табл. 10 подвергнуты статистическому сравнению результаты первого и второго сезонов по одному из сроков фиксации.

Таблица 10

Сравнение аналогичных опытов двух сезонов

Вариант опыта	% ненормальных анафаз		χ^2	n	P
	опыты первого сезона	опыты второго сезона			
„24“	23,0	22,0	0,029	1	0,86
„6—I“	10,0	11,0	0,044	1	0,83
„6—II“	31,0	25,0	0,746	1	0,39
„0,5—I“	12,0	8,3	3,186	1	0,08
„0,5—III“	13,0	9,2	0,268	1	0,61
Опыт в целом			4,273	5	0,51

Статистический анализ показывает очень хорошее соответствие как между опытами в целом, так и между отдельными вариантами. Причем это соответствие не связано с малой разницей между вариантами, которая оказывается вполне реальной. В табл. 11 для этого же материала произведено сравнение процента ненормальных анафаз каждого варианта с таковым для опыта в среднем.

Таблица 11

Сравнение процентов ненормальных анафаз в отдельных вариантах со средним по опыту

Вариант опыта	%	χ^2	n	P
„24“	22,5	3,90	1	0,0480
„6—I“	10,6	5,27	1	0,0220
„6—II“	27,7	12,61	1	0,0004
„0,5—I“	10,6	4,91	1	0,0260
„0,5—III“	10,2	3,03	1	0,0800
Опыт в целом		29,72	4	0,000006

Анализ показывает, что такой или большей разницы между вариантами, чем получена в опыте, можно ожидать только в шести случаях из миллиона (вероятность примерно в 100 000 раз меньше, чем для вариации между опытами двух лет). Ввиду очень хорошего соответствия между обеими сериями опытов мы их результаты объединили и в дальнейшем будем рассматривать суммированные данные.

На рис. 7 изображен процент ненормальных митозов для разных сроков фиксации. В обоих направлениях наблюдается удовлетворительное соответствие. При всех сроках фиксации и для всех интенсивностей

(за одним случайным исключением) облучение на более поздних стадиях замачивания вызывает больший эффект. Это показывает, что наблюдаемая цитологическая разница (соответствующая полученной в вегетационных опытах) не является кратковременной. Кроме того, из рисунка видно, что скорость уменьшения ненормальностей во времени приблизительно одинакова во всех вариантах и от фиксации к фиксации уменьшается в одинаковое число раз. Более подробный анализ показывает, что число

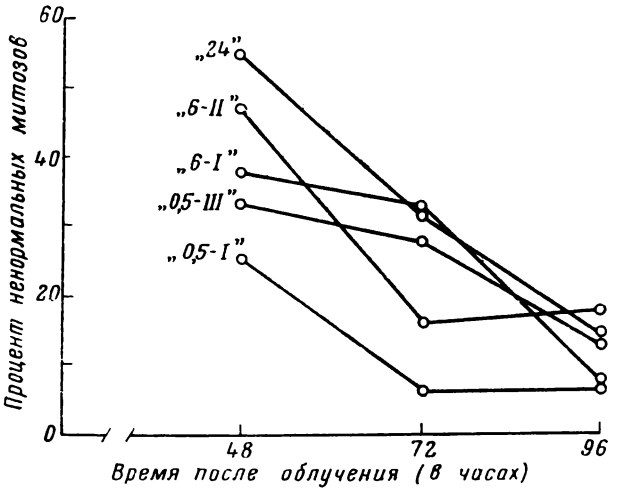


Рис. 7. Процент ненормальных митозов через разное время после γ-облучения семян гороха дозой 5 000 *r* на разных стадиях набухания при разной интенсивности облучения

клеток, имеющих мостики и фрагменты, уменьшается вдвое соответственно через 27 и 10 час. Это позволяет привести все данные к одному сроку фиксации, что дает больший и, следовательно, более надежный материал. Обработанные таким образом цифры представлены в табл. 12.

Таблица 12

Число разных типов ненормальностей в меристеме корня для разных вариантов через 72 часа после конца замачивания

Вариант опыта	Общее число клеток	Клетки					
		ненормальные		с мостиками		с фрагментами	
		число	%	число	%	число	%
„24"	700	207	29,6	145	20,7	114	16,3
„6—I"	743	153	20,6	121	16,3	38	5,1
„6—II"	800	216	27,0	172	21,5	88	11,0
„0,5—I"	636	85	13,4	57	9,0	29	4,6
„0,5—II"	630	85	13,5	67	10,6	37	5,9
„0,5—III"	400	91	22,7	68	17,0	27	6,8

На рис. 8 изображен процент клеток с мостиками и фрагментами для разных вариантов опытов. При этом оказывается, что число клеток с мостиками заметно выше в вариантах, получивших протрагированное облучение; интересно отметить, что и тут несколько более чувствительны-

ми в обеих группах (как при протрагированном, так и при концентрированном облучении) оказываются последние фазы набухания семян. Фрагменты же еще более отчетливо повторяют картину, представленную на рис. 7, где графически изображены суммарно колебания процента мостиков и фрагментов.

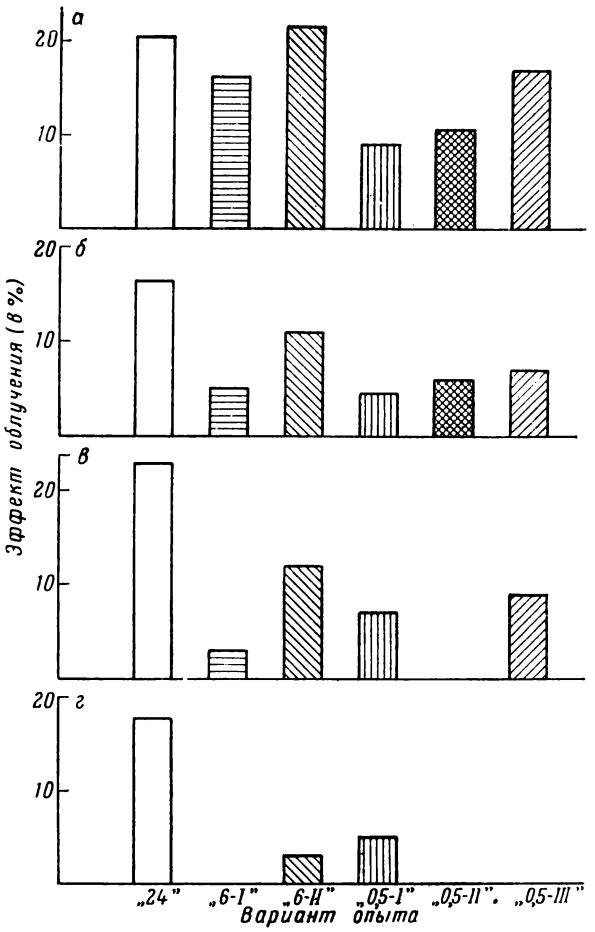


Рис. 8. Влияние фактора времени и стадии набухания семян на эффект облучения дозой 5 000 *r*:

а — клетки с мостиками; *б* — клетки с фрагментами; *в* — сверхфрагментация; *г* —сверхфрагментация при дозе облучения 250 *r*

В этом опыте часто наблюдалось изредка встречавшееся и раньше явление, названное нами «сверхфрагментацией», которое заключается во множественном раздроблении (на десятки фрагментов) всего набора как нормальных, так и уже фрагментированных хромосом. На рис. 8 приведены соответствующие количественные данные для обеих серий этого опыта (5000 и 250 *r*). Интересно, что это своеобразное явление относительно часто наблюдается и при облучении слабой дозой (при которой процент ненормальных митозов ничтожен и нами не приводится); совершенно ясно обнаруживается оно и при наиболее протрагированном действии радиации.

Таким образом, наблюдения за распределением ненормальных митозов в различных сериях и вариантах опытов свидетельствуют

о соответствии биологических и цитологических данных, указывающих, с одной стороны, на большую чувствительность семян к облучению в последней фазе набухания и, с другой стороны, на бо́льшую эффективность протрагированного облучения. Результаты опытов с γ-облучением семян показали настолько сложную зависимость эффекта от каждого из варьировавшихся факторов (фазы набухания и концентрации дозы), что полное объяснение всех наблюдаемых явлений требует постановки ряда специальных опытов.

Как уже было сказано, чтобы выяснить, насколько описываемые эффекты являются общими, во втором сезоне наряду с повторными опытами на горохе были поставлены аналогичные опыты с пшеницей. С цитологической стороны опыт анализировался только выборочно. Однако и полученные данные (табл. 13) представляют некоторый интерес. И в этом случае наблюдается параллелизм между цитологическими данными и результатами вегетационных опытов, а также явление, аналогичное «сверхфрагментации» у гороха, хотя морфологически типичной «сверхфрагментации» у пшеницы мы не наблюдали.

Таблица 13

Результат цитологического исследования в опыте с пшеницей

Вариант опыта	Процент анафаз			Число мостиков на 100 клеток	Число фрагментов на 100 клеток
	ненормальных	с мостиками	с фрагментами		
„24“	63,0	52,7	34,2	103,0	84,2
6—II“	94,3	83,7	39,6	204,0	177,0

Из табл. 13 видно, что, хотя процент клеток с фрагментами в обоих вариантах почти одинаков, число фрагментов на клетку в варианте «6—II» вдвое больше, чем в варианте «24»; происходит диспропорциональный рост числа фрагментов по сравнению с общим процентом ненормальных клеток,— то, что в конечном счете и определяет феномен «сверхфрагментации».

Экспериментальный анализ. Чтобы определить роль разного времени набухания на эффект, были поставлены опыты, в которых семена гороха подвергались воздействию одной и той же дозы (5000 *r*) в разные сроки после начала замачивания. Продолжительность облучения составляла 26 мин., это была минимальная экспозиция, возможная при нашем источнике лучей.

Результаты этих опытов изображены на рис. 9. В полученной кривой *1* можно различить три участка. В первые часы замачивания радиочувствительность семян быстро растет, однако приблизительно к 15 час. кривая приобретает асимптотический характер; между 15 и 24 час. лежит «плато» — чувствительность существенно не меняется; где-то между 24 и 36 час. (т. е. после конца замачивания) радиочувствительность снова начинает быстро возрастать, причем это возрастание продолжается до конца опыта (48 час.); к 36 час. число измененных клеток достигает уже 99%. Дальнейший рост радиочувствительности можно проследить по кривой *2* рис. 9, изображающей не число измененных клеток, а число изменений (мостиков и фрагментов) на клетку; при таком изображении кривая верхнего предела не имеет. Увязать отдельные участки кривой с определенными биологическими и физико-химическими процессами, конечно, нельзя, однако, здесь напрашиваются некоторые аналогии. Началь-

ный рост радиочувствительности идет параллельно степени набухания, которая при данной температуре (около 22° С) достигает максимума также к 15 час.

Ввиду такого параллелизма кривой набухания и кривой радиочувствительности нет оснований думать о роли каких-либо других процессов, кроме изменения содержания воды в семени. Нам кажется, что повышение радиочувствительности на этом участке (0—15 час. замачивания) обусловливается тем, что с увеличением содержания воды увеличивается выход продуктов ее радиолиза, действующих на клетки семени аналогично прямой ионизации. Что касается дальнейшего подъема чувствительности (после 24 час. замачивания), то он, несомненно, связан с начинающимся развитием ростка.

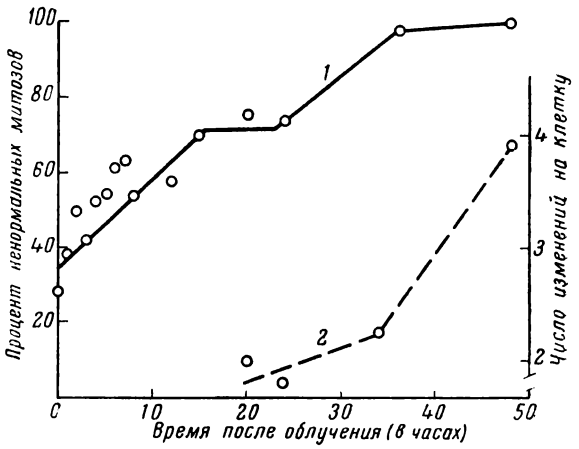


Рис. 9. Изменения радиочувствительности во время набухания семян гороха

1 — процент ненормальных митозов при облучении семян дозой 5000 *r* после разного времени замачивания их в воде; *2* — среднее число мостиков и фрагментов в клетках тех же семян

Другие специальные опыты были поставлены с целью изучения влияния фактора времени, не осложненного явлениями, связанными с набуханием и развитием. Эти опыты ставились на семенах в тот период их замачивания, когда их радиочувствительность почти не изменялась, т. е. в промежутке от 16 до 24 час. после начала замачивания. Семена гороха облучались дозой 5000 *r* в виде двух равных фракций, разделенных промежутком времени в 2; 4; 6 или 8 час. Таким образом, каждая группа получила дозу, и 2500 *r* через 16 час. после начала замачивания, и еще 2500 *r* соответственно через 18, 20, 22 или 24 часа.

Контрольные семена облучались дозой 5000 и 2500 *r* через 16 и 24 часа. Материал фиксировался дважды: через равное время после начала замачивания и через равное время после конца облучения. Та и другая фиксация дала одинаковые цифры, и потому результаты по ним были суммированы. Контроль в начале и в конце облучения дал не совсем одинаковые цифры, однако разница была невелика и для двух доз (5000 и 2500 *r*) направлена в разные стороны.

Результаты этого опыта изображены на рис. 10. Из рисунка видно, что при увеличении интервала между облучениями эффект вначале понижается, затем повышается, иногда даже превышая действие однократной дозы (5000 *r*), а затем вновь понижается.

Это явление мы склонны объяснить следующим образом. Фракционированное или растянутое облучение обычно дает меньший эффект, чем однократное и концентрированное. Это известно давно и вызвано тем, что частично пораженные клетки ко времени добавочного поражения успевают в некоторой степени восстановиться. Наряду с этим наблюдается и другой эффект, так называемый «обратный фактор времени», при котором фракционированное (растянутое) облучение действует сильнее. Мы объясняем это тем, что облучение оказывает действие (прямое или косвенное) на нуклеиновые кислоты, вызывая уменьшение их количеств (Лучник, 1956б). При этом, как показал Дарлингтон (Darlington, 1947), клетка становится более чувствительной к внешним воздействиям. Таким образом, если клетка облучается вторично в момент, когда содержание нуклеиновых кислот в ней уменьшено, то эффект облучения должен быть больше.

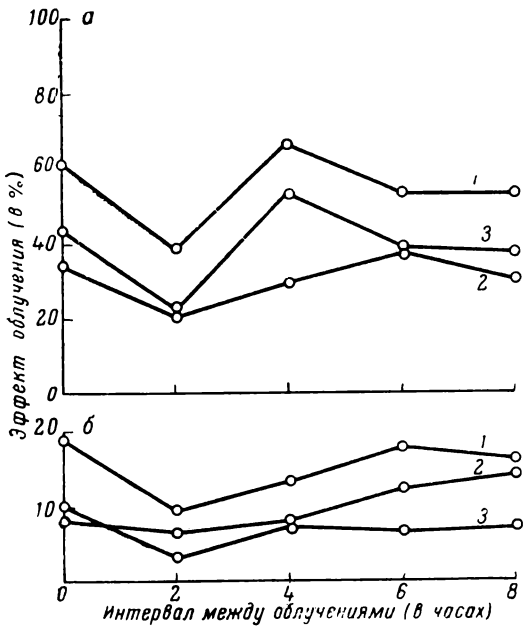


Рис. 10. Влияние фракционирования облучения (доза 5 000 *r*) на процент ненормальных митозов в анафазе (*а*) и телофазе (*б*)

1 — ненормальные клетки; *2* — клетки с мостиками; *3*— клетки с фрагментами

Для сопоставления возникающих под действием облучения изменений в радиочувствительности с содержанием и состоянием нуклеиновых кислот было поставлено несколько специальных опытов. В табл. 14 приведены данные, касающиеся изменений митотической активности и содержания тимонуклеиновой кислоты и меристематических клетках гороха

Таблица 14

Митотическая активность, содержание и состояние нуклеиновой кислоты в ядрах клеток корневой меристемы гороха через разное время после облучения

Время после облучения (в час.)	% делящихся клеток	Содержание тимонуклеиновой кислоты	Структура хромосом
1	10,3	++++	Нормальные
2	8,9	++++	Клейкие
3	8,2	++++	Клейкие
4	6,6	++++	Клейкие
5	3,4	+++	Клейкие
6	3,4	++	Тонкие
8	5,4	++	Тонкие
10	2,3	+	Тонкие
12	2,4	0	Тонкие

после облучения (таблица составлена на основании нескольких опытов по облучению проростков дозами 500—700 *r*).

Из таблицы видно, что скорость деления клеток несколько уменьшается сразу после облучения, но особенно сильное падение ее происходит между 4 и 5 час. Содержание в ядрах полимерной дезоксирибонуклеиновой кислоты, определявшееся при помощи нуклеальной реакции Фельгена и оценивавшееся по пятибалльной системе, также начинает уменьшаться между 4 и 5 час., причем к 12 час. реакция становится полностью отрицательной. Иллюстрацией этому может служить рис. 11, *б*,

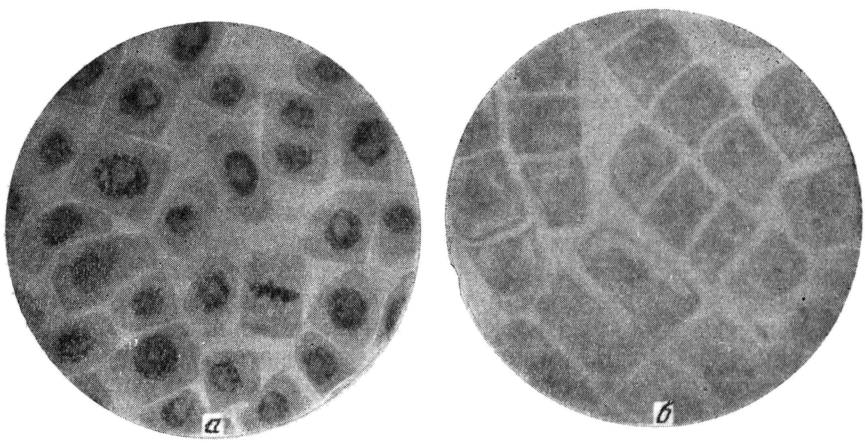


Рис. 11. Меристематические клетки гороха в контроле (*а*) и через 6 часов после облучения (*б*). Окраска по Фельгену, увеличение в 560 раз

где изображены меристематические клетки гороха через 6 час. после облучения, окрашенные по Фельгену; рядом (*а*) для сравнения дана картина необлученной меристемы. Существенные изменения претерпевает также внешний вид хроматина (наблюдения при окраске лакмоидом). Если через час после облучения хромосомы имеют еще нормальный вид, то уже через 2 часа хроматин становится как бы клейким. Это выражается в положительном гетеропикнозе и склеивании хромосом, что при разной степени проявления может обусловить появление мостиков или слипание всего хроматина, например в метафазе, в одну компактную массу. Начиная с 5—6-го часа после облучения эта картина постепенно, но довольно быстро сменяется новой: хромосомы становятся тонкими и как бы рыхлыми [1].

Что касается содержания рибонуклеиновой кислоты и микроскопической структуры цитоплазмы, то последние также претерпевают изменения после облучения. Цитоплазма вскоре после облучения принимает вакуолизированный или гранулированный вид, тогда как в необлученных клетках при том же методе фиксации (Карнуа) она кажется совершенно гомогенной. Содержание же рибонуклеиновой кислоты, как показывают наблюдения в ультрафиолетовых лучах (280—250 ммк), одинаково поглощаемых тимо- и рибонуклеиновой кислотой, в первые часы после облучения скорее не понижено, а даже повышено; в более поздние сроки содержание рибонуклеиновой кислоты понижается по сравнению с необлученным контролем.

[1] Некоторые авторы называют это состояние отрицательным гетеропикнозом, эрозией или кариорексисом, что знаменует собой уменьшение содержания нуклеиновой кислоты, так называемое «нуклеиново-кислотное голодание» (Дарлингтон).

Приведенные результаты показывают, что изменение чувствительности связано с изменением в содержании и состоянии тимонуклеиновой кислоты. При этом необходимо отметить, что радиочувствительность изменяется не параллельно колебаниям содержания тимонуклеиновой кислоты, а возрастает в какой-то переломный момент, когда митотическая активность быстро падает, содержание тимонуклеиновой кислоты начинает уменьшаться, а хроматин переходит из стадии положительного в стадию отрицательного гетеропикноза. Это дает некоторое основание думать, что изменения в структуре нуклеиново-кислотных образований, а может быть, и в содержании тимонуклеиновой кислоты не являются следствием лучевого поражения, а отражают собой адаптационную реакцию клетки на происходящие в ней или в окружающей среде изменения.

В связи с тем, что действие облучения на нуклеиновые кислоты вызывает повышение радиочувствительности, нам хочется упомянуть о результатах наших опытов по изучению изменений во времени цитологических аномалий, вызванных облучением разной интенсивности. Если облучение проростков определенной дозой происходит в течение 2 мин., то процент цитологических ненормальностей быстро повышается, достигая максимума к 6 час., а затем понижается приблизительно пропорционально логарифму времени. Если же подобная доза дается в течение 30 мин., то после того же 6-часового максимума и последующего падения через 24 часа после облучения наблюдается новый подъем числа ненормальностей митоза. Мы склонны объяснять это явление тем, что 6-часовой максимум является результатом прямого действия радиации на хромосомы, а 24-часовой — следствием косвенного эффекта, обусловленного изменениями в метаболизме дезоксирибонуклеиновой кислоты, причем для проявления последнего эффекта необходима определенная продолжительность облучения (Лучник, 1956б).

Подводя итоги экспериментального анализа, мы можем сделать следующие выводы. В «основных опытах» на результаты влияли две группы факторов, связанные со стадией развития, с одной стороны, и с интенсивностью облучения — с другой. Изменения радиочувствительности семян во время их набухания связаны с двумя процессами. Один из них, действующий в течение первых 15 час. замачивания, обусловлен повышением содержания воды в семени, что создает, говоря в самой общей форме, более благоприятные условия для миграции энергии в облученной ткани. Второй процесс, начинающийся уже после конца 24-часового замачивания, связан с изменениями, сопровождающими начинающееся прорастание.

Распределение во времени дозы облучения также вызывает два эффекта. Первый — уменьшение эффекта при протрагировании или фракционировании дозы, связанное со способностью объекта к частичному восстановлению после поражения. На этот «тривиальный фактор времени» накладывается второй эффект, заключающийся в значительном, но преходящем повышении радиочувствительности, которое можно связать с вызванными облучением изменениями в состоянии и содержании дезоксирибонуклеиновой кислоты. При этом нам кажется, что эти изменения следует считать не только результатом поражения, но в значительной мере и отражением адаптационной реакции клетки.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Полученные в описанных выше опытах результаты можно подытожить следующим образом.

Опыт с применением рентгеновских лучей показал, что чувствительность сухих, набухших и проросших семян гороха к облучению весьма различна; в общем чувствительность этих стадий относится одна к другой

примерно как 1 : 5 : 50. Слабые дозы, которыми были облучены сухие (500 *r*) и набухшие (100 и 250 *r*) семена, обусловили небольшую, но реальную стимуляцию роста и развития растений.

Во всех сериях опыта с применением γ-лучей на горохе были получены принципиально сходные результаты, сводящиеся к тому, что более чувствительными оказались поздние стадии набухания и что протрагированное облучение оказалось эффективнее концентрированного; только в двух сериях эти принципиально сходные результаты получились с противоположными знаками: сильная доза (5000 *r*) на поздних стадиях набухания и при протрагированном облучении вызывала заметное угнетение растений, а слабая доза (150—250 *r*) при тех же условиях вызывала некоторую их стимуляцию.

Цитологический анализ материала (определение процента ненормальных митозов) при применении как рентгеновских, так и γ-лучей дал картину, совершенно сходную с вышеописанной. Большой интерес представляет обнаружение своеобразной «сверхфрагментации» хромосом, несомненно связанной с действием излучений на нуклеиновые кислоты клетки и особенно заметно проявившейся опять-таки при тех же условиях, что и общие биологические эффекты и ненормальности митозов; однако этот своеобразный эффект был достаточно четко выражен и при слабой дозе γ-облучения.

В том, что обнаруженные закономерности не случайны, убеждает сравнение результатов опытов двух сезонов на горохе: в них были получены хорошо совпадающие данные; небольшие количественные расхождения вполне объяснимы разницей вегетационных условий обоих сезонов.

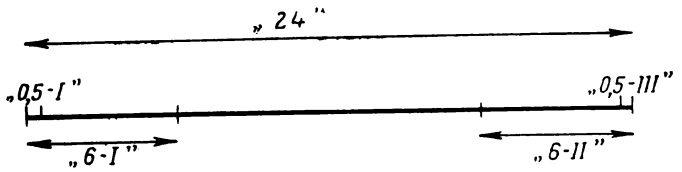
В опытах на пшенице, которые носили ориентировочный характер и были поставлены в основном для проверки общности выводов, полученных в опытах на горохе, получилась сходная картина: наибольший эффект был обнаружен в вариантах «24», «6—II» и «0,5—III». Все сказанное наглядно иллюстрируется рис. 12, где в виде схемы сопоставлены результаты опытов с большими и малыми дозами облучения на пшенице и горохе.

То обстоятельство, что последние стадии набухания семян оказались более чувствительными к облучению, само по себе достаточно тривиально и вытекает из давно известного факта меньшей радиочувствительности покоящихся и лишенных свободной воды семян растений (Wertz, 1940; Knapp, Kaplan, 1942 и др.). Для объяснения этого общеизвестного явления в радиобиологии и биофизике существуют ряд гипотез, из которых, однако, ни одна не может считаться безупречной. По-видимому, объяснение этого явления должно быть связано как с изменяющимися по мере увлажнения тканей условиями внутри- и межмолекулярного транспорта энергии излучений, абсорбированной единицей массы тканей (Riehl, Rompe, Timofeeff-Ressovsky, Zimmer, 1943), так и с изменением химической и биохимической активности биологически важных компонентов тканей.

Весьма интересно, с нашей точки зрения, наблюдающееся параллельное изменение чувствительности по отношению к угнетающему действию сильных и стимулирующему действию слабых доз. Интересный параллелизм проявился и в отношении «обратного фактора времени», т. е. большей эффективности протрагированных доз; и это явление, по-видимому, в равной мере относится как к угнетению сильными, так и к стимуляции слабыми дозами.

Проценты ненормальных митозов, как мы видели, распределяются совершенно аналогично степени угнетения растений в разных вариантах обоих опытов; в этом мы видим если и не полное, то во всяком случае существенное объяснение самого феномена угнетения, ибо тот же параллелизм мы наблюдали и раньше при сравнении стимулирующих и угнетающих влияний различных концентраций β- и α-излучателей. Наблюдавшееся

нами любопытное явление «сверхфрагментации», проявляющееся также и при действии относительно очень слабых доз, особенно же при протрагированном облучении, представляет особенный интерес ввиду своей несомненной связи с нуклеиновым обменом, или, говоря более общо и осторожно, с судьбой нуклеиновых кислот в клетке. Возможно, что действие слабых



Вариант опыта	Сильная доза			Слабая доза	
	Горох	Пшеница	Цитологические ненормальности	Горох	Пшеница
„24"	— — —	— —	— — —	+ + +	+ + +
„6-I"	—	— —	—	+	+
„6-II"	— —	— — —	— — —	+ + +	+ +
„0,5-I"	—	—	—	+	+
„0,5-III"	— — —	— — —	— — —	+ + +	+ +

Рис. 12. Схема постановки опытов (вверху) и основных результатов опытов с гамма-облучением (внизу). Число плюсов и минусов обозначает степень положительного и отрицательного воздействия слабой и сильной дозы

протрагированных доз на нуклеиновый обмен клетки повышает вероятность обычных, так сказать «нормальных», разрывов хромосом под влиянием облучения, тем самым являясь главнейшей причиной проявления в известных условиях действия «обратного фактора времени». Возможно также, что, проявляясь и при воздействии слабых доз, сверхфрагментация окажется пригодным индикатором при попытках цитологического анализа явления стимуляции.

Результаты описанных опытов небезынтересны и в связи с поставленной во введении проблемой анализа стимулирующих действий применяемой нами методики замачивания семян в слабых растворах излучателей. Во-первых, показана бóльшая чувствительность последних фаз набухания семян, а во-вторых, наличие обратного фактора времени и в связи с этим большей эффективности протрагированного облучения. Варьируя сроки замачивания и концентрации растворов излучателей, в нашей лаборатории удалось показать (Тимофеев-Ресовский, Порядкова, Макаров и Преображенская, 1957), что наилучший эффект достигается длительным замачиванием семян в растворах более слабых концентраций; это хорошо согласуется с результатами описанных здесь опытов. Наличие некоторой стимуляции при слабом протрагированном воздействии на непроросшие семена

(даже при облучении извне) и отсутствие каких-либо намеков на стимуляцию при облучении прорастающих семян является новым указанием на известную аналогию стимулирующего действия излучений со стимулирующим действием на семена термических и химических факторов. Все эти явления вызываются воздействием на одну и ту же стадию в развитии растений («оживающее семя») и несомненно сходны по последующим эффектам (небольшое ускорение развития, более дружное зацветание, повышение урожая растений).

ВЫВОДЫ

1. Было поставлено два типа опытов по облучению семян гороха. В первом сухие семена облучались дозами 500, 1000, 5000, 10 000 и 20 000 *r*, набухшие — дозами 100, 250, 500, 1000 и 5000 *r* и проросшие — теми же дозами жестких рентгеновских лучей. В опытах второго типа семена облучались сильными (5000—6000 *r*) и слабыми (150—250 *r*) дозами γ-излучения Co^{60} с разной интенсивностью на разных стадиях набухания во время 24-часового замачивания в воде; экспозиции были для обеих доз: 24 часа, 6 час. в начале замачивания, 6 час. в конце замачивания, 0,5 часа в начале, 0,5 часа в середине или 0,5 часа в конце замачивания. Помимо этого, по тому же плану, что и опыты второго типа на горохе, были поставлены опыты на пшенице.

2. Растения, облученные рентгеновскими лучами, были убраны в фазе цветения, у них учитывались вес надземной массы, число стеблей и число цветков. Растения, подвергавшиеся γ-облучению, были убраны в стадии полной зрелости, причем учитывались вес семян, вес надземной массы и отношение веса семян к весу надземной массы. Все опыты сопровождались цитологическим контролем.

3. Результаты уборки растений, облученных рентгеновскими лучами, показали в сериях сухих и набухших семян небольшую стимуляцию от наиболее слабых доз, обычное возрастание угнетения растений с повышением дозы, наименьшую радиочувствительность сухих и наибольшую — проросших семян, с примерным отношением чувствительности сухих, набухших и проросших, как 1 : 5 : 50. Определение процента ненормальных анафаз при разных дозах и в разных сериях опыта показало примерно те же отношения.

4. Результаты уборки конечного урожая γ-облученных растений гороха показали, что сильная доза (5000 *r*) вызывает наибольшее угнетение при наиболее протрагированном облучении (24 часа) и при воздействии на семя на последних фазах набухания (6 час. и 0,5 часа в конце замачивания); и в этом случае результаты цитологического анализа были совершенно аналогичны полученным при уборке растений.

При γ-облучении семян гороха слабой дозой (150—250 *r*) в тех же вариантах (24 часа, 6 час. или 0,5 часа в конце замачивания), которые при применении сильной дозы обнаруживали максимум угнетения, была получена заметная стимуляция растений. Цитологический анализ при этой дозе не показал заметного повышения процента ненормальных митозов; но при протрагированном облучении, так же как и в первой серии, наблюдалась своеобразная реакция хроматина, выражавшаяся в «сверхфрагментации».

5. Опыты с пшеницей, поставленные по той же схеме, дали сходные результаты.

6. Дополнительные опыты и специальные цитологические исследования позволили расчленить действие отдельных факторов. В процессе набухания и прорастания семян их радиочувствительность изменяется под действием двух факторов: гидратации и начинающихся физиологических

процессов. «Обратный фактор времени» обусловлен резким возрастанием чувствительности через 4—6 час. после начала облучения, что связано, по-видимому, с изменениями в обмене нуклеиновых кислот.

7. Наиболее существенным результатом этих опытов является установление исключительно высокой чувствительности проросших семян, а у набухающих семян большей чувствительности последних фаз набухания, а также большей эффективности протрагированных доз по сравнению с концентрированными. Установленные закономерности в одинаковой мере относятся к угнетению растений и появлению ненормальных митозов под влиянием сильных доз и некоторой стимуляции развития растений при применении слабых доз.

В заключительной главе кратко обсуждаются полученные результаты.

ЛИТЕРАТУРА

Атабекова А. И. Действие рентгеновых лучей на семена и проростки гороха. Биол. журн., 1936, т. 5.

Атабекова А. И. О влиянии лучей Рентгена на рост и развитие гороха. Биол. журн., 1937, т. 6.

Атабекова А. И. О стимулирующем действии лучей Рентгена на растения. «Природа», 1938, № 7—8.

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

Бреславец Л. П., Афанасьева А. С. Действие рентгеновых лучей на рожь. II. Облучение семян. «Вестник рентгенологии», 1935а, т. 14.

Бреславец Л. П., Медведева Г. Г., Афанасьева А. С. Действие рентгеновых лучей на рожь. I. Облучение проростков. «Вестник рентгенологии», 1935б, т. 14.

Лучник Н. В. Цитологический анализ действия больших и малых доз ионизирующих излучений на растения. Тезисы конференции мед. радиол., Гигиенич. секция. М., Медгиз, 1956а.

Лучник Н. В. О влиянии фракционирования и мощности дозы на цитологический эффект облучения. Биофизика, 1956б, т. 1, № 7.

Лучник Н. В. Об аномальной реакции при малых дозах облучения. «Биофизика», 1957, т. 2, № 1.

Порядкова Н. А. Методика и результаты некоторых опытов по радиостимуляции растений. «Биофизика», 1956, т. 1, № 7.

Порядкова Н. А., Макаров Н. М., Преображенская Е. И. Опыты по радиостимуляции растений. Тезисы конференции мед. радиол., Гигиенич. секция. М., Медгиз, 1956.

Тимофеев-Ресовский Н. В., Порядкова Н. А., Макаров Н. М., Преображенская Е. И. Проблема радиостимуляции растений. I. О действии слабых доз ионизирующих излучений на растения. Тр. Ин-та биол. УФАН СССР, вып. 9. Свердловск, 1957.

Чехов В. П. Влияние Х-лучей на растения. Тр. Томского гос. университета. Изд. Томского ун-та, Томск, 1932, т. 85.

Brunst V. V. The problem of roentgen stimulation. Amer. J. Roentgenol., 1952, vol. 68, p. 281.

Darlington C. D. Nucleic acid and chromosomes. Symp. soc. Exper. Biol., Cambridge, Univ. Press, 1947, vol. 1, p. 252.

Griffith H. D., Zimmer K. G., The time-intensity factor in relation to the genetic effects of radiation. Brit. J. Radiol., 1935, vol. 8, p. 40.

Knapp E., Kaplan R., Beeinflussung der Mutationsauslösung und anderer Wirkungen der Röntgenstrahlen bei Antirrhinum majus durch Veränderung des Quellungszustandes der zu bestrahlenden Samen. Z. Abstammungslehre, 1942, Bd. 80, S. 501.

Lea D. E. Actions of radiations on living cell. Univ. Press. Cambridge, 1946.

Riehl N., Rompe R., Timoféeff-Ressovsky N. W., Zimmer K. G., Über Energiewanderungsvorgänge und ihre Bedeutung für einige biologische Processe. «Protoplasma», 1943, Bd. 38, N 1.

Timofeeff-Ressovsky N. W., Zimmer K. G. Biophysik, Bd. I, Hirzel. Leipzig, 1947.

Wertz E. Über die Abhängigkeit der Röntgenstrahlenwirkung vom Quellungszustand des Gewebes nach Untersuchungen an Gerstenkörnern. Strahlentherapie, 1940, Bd. 67, S. 307; 536, 700; Bd, 68, S. 136, 287.

АКАДЕМИЯ НАУК СССР
УРАЛЬСКИЙ ФИЛИАЛ

Вып. 12 ТРУДЫ ИНСТИТУТА БИОЛОГИИ 1960

Н. В. ТИМОФЕЕВ-РЕСОВСКИЙ

РАСПРЕДЕЛЕНИЕ РАССЕЯННЫХ ЭЛЕМЕНТОВ ПО КОМПОНЕНТАМ ВОДОЕМОВ

I. НЕКОТОРЫЕ ОБЩИЕ СООБРАЖЕНИЯ

1. За первые два десятилетия нашего века, в основном под влиянием замечательных работ и идей В. И. Вернадского, сформировалась новая отрасль естествознания — геохимия как особая наука об истории и судьбе химических элементов в земной коре. Эта судьба определяется, как известно, двумя основными группами факторов: внутренними и внешними геологическими процессами. При этом внутренние геологические процессы, главным образом горообразование и вулканизм в широком смысле слова, являются в основном поставщиками магматического материала на поверхность земного шара и в земную кору. На дальнейшую судьбу и распределение химических элементов в земной коре, гидросфере и атмосфере они влияют лишь косвенно, частично определяя интенсивность и направление денудационных процессов. В дальнейшем распределение, рассеяние и концентрация химических элементов в земной коре в значительной мере определяются внешними геологическими процессами денудационного характера, в которых принимают участие воздух, вода и живые организмы в связи с колебаниями общеклиматических факторов, изменениями интенсивности и направления стока и вариациями в распределении биомассы на поверхности земли. Наряду с этим большое значение в судьбе элементов имеет, как особенно ясно было показано А. Е. Ферсманом и В. М. Гольдшмитом, строение атомов и ионные радиусы различных химических элементов; ими определяются процессы сорбции и изоморфизма, играющие весьма существенную роль как в образовании пород, так и в миграции, в том числе и биогенной, элементов в биосфере.

2. Начиная с конца второго десятилетия текущего века В. И. Вернадский особенно много внимания уделял роли живых организмов в геохимических процессах. К 1926 г. им было сформулировано общее учение о биосфере. Сохранив старый зюссовский термин, он вложил в него совершенно новое содержание. Биосфера, в понимании В. И. Вернадского, обнимает ту часть поверхности земли, в которой основную геохимическую роль играют живые организмы. В нее входит, таким образом, не только собственно пленка живых организмов (выделяемая Е. М. Лавренко в отношении растений в понятие фитосферы), но и вся тропосфера, гидросфера и бóльшая часть толщи осадочных пород и продуктов денудации, имеющих преимущественно или частично биогенное происхождение; эту часть общей биосферы В. И. Вернадский иногда называет остатками былых биосфер.

3. В связи с большой и специфической ролью, которую играют живые организмы в геохимии биосферы, В. И. Вернадским была сформулирована особая дисциплина — биогеохимия. Основной ее задачей является изучение участия живых огранизмов в энергетических процессах биосферы, круговороте, миграции и концентрации химических элементов, денудационных процессах, формировании почв, природных вод и осадочных пород.

4. При этом биогеохимия является дисциплиной геохимической и изучает живые организмы лишь в качестве одного из геохимических факторов. На современном этапе развития биогеохимия неизбежно является наукой «больших масштабов». Ее хорологическая проекция, установление и изучение биогеохимических провинций, также должна являться пока районированием в рамках общего изучения геохимических ландшафтов.

5. Однако наряду с биогеохимией уже сейчас возможно и необходимо развитие «встречной» биологической дисциплины. Биогеохимия изучает в сравнительно больших масштабах преимущественно результат биогеохимической деятельности живых организмов, естественно концентрируя свое внимание на общих геохимических закономерностях и частной геохимии отдельных элементов. Задачей же соответствующей биологической дисциплины должно являться детальное изучение отдельных элементарных биоценозов в тесной связи со всеми косными компонентами занимаемой ими территории; при этом необходимо охватить круговорот энергии и элементов, перераспределение элементов в пределах занимаемого биоценозом участка земной поверхности и его связи с соседними. Эта биологическая дисциплина будет вскрывать конкретные механизмы геохимической деятельности отдельных видов и определенных сообществ живых организмов. Эта новая дисциплина будет находиться в таких же отношениях с биогеохимией, в каких изучение микроэволюционных процессов находится с общим изучением макроэволюции (Тимофеев-Ресовский, 1938, 1940; Бауэр и Тимофеев-Ресовский, 1943).

6. Такая биологическая дисциплина уже создана и названа В. Н. Сукачевым биогеоценологией (Сукачев, 1945, 1947, 1948, 1949; Сукачев и др., 1950). Большинство школ и направлений классической биоценологии занимается в сущности лишь процессами формирования и перестроек сообществ живых организмов, вынося, так сказать, за скобки, как само собой разумеющуюся, связь биоценоза с биотопом. Биогеоценология в понимании В. Н. Сукачева естественно устраняет разрыв между биоценозом и соответствующим биотопом, объединяя их в общее понятие биогеоценоза; при этом исследовательская задача ставится в «геохимическом стиле В. И. Вернадского». Задачей биогеоценологии, согласно В. Н. Сукачеву, является изучение баланса энергии и химических элементов живых и косных компонентов в пределах биогеоценоза.

7. Биогеоценология ставит себе, таким образом, важные и актуальные задачи: она в сущности должна явиться главной основой будущего рационального изучения и использования человеком естественных биологических продуктивных сил Земли. В частности, велика будет и ее роль в получении человеком, путем накопления определенными живыми организмами, некоторых редких и рассеянных элементов в сверхкларковых концентрациях. Конечно, для создания при помощи биогеоценологических исследований рациональных основ освоения и изучения биологических производительных сил Земли и нахождения конкретных биогеохимических механизмов необходимо скорейшее развитие комплексных стационарных работ по изучению биогеоценозов.

8. Наряду с таким изучением природных биогеоценозов, их классификацией и биогеоценологическим анализом природных ландшафтов, совершенно необходимо развитие экспериментальной биогеоценологии (Тимо-

феев-Ресовский, Порядкова, Сокурова и Тимофеева-Ресовская, 1957). Задачей этой дисциплины должно являться создание «искусственных биогеоценозов» или выделение мелких природных участков точно известного биогеоценологического состава, которые можно в целях эксперимента подвергать определенным энергетическим воздействиям, вносить в них точно контролируемые вещества или производить качественные и количественные изменения в сообществах живых организмов. Такие эксперименты полностью соответствуют задачам и целям биогеоценологических исследований. Развитие экспериментальной биогеоценологии может сильно ускорить накопление и уточнение соответствующих данных и тем заметно облегчить работу в области как общей биогеоценологии, так и биогеохимии.

9. Помимо чисто теоретических, экспериментальная биогеоценология может разрешать и ряд практических задач, непосредственно связанных с агрономией в широком смысле слова, использованием природных ресурсов и изучением воздействия человека, в особенности через современную промышленность, на биологические ресурсы и протекание биогеохимических процессов в природе.

10. Из геологии хорошо известна большая разница в пластах, образовавшихся на суше и в водоемах. В морских и пресноводных водоемах механизм осадкообразования, геохимические процессы, условия миграции и концентрации элементов, а также характер участия во всех этих процессах живых организмов иные, чем на суше. Суша и водоем различаются и по столь мощному фактору перераспределения элементов, каким является сток. Поэтому совершенно законно говорить о геохимии моря (Виноградов, 1935, 1937, 1944), о геохимии почв (Виноградов, 1950) или о геохимических ландшафтах суши (Перельман, 1955). В экспериментальной биогеоценологии вся методика работ с водоемами также весьма резко отличается от таковой при работе с наземными биоценозами. Следует ожидать, что в водоемах ведущими будут иные биогеохимические механизмы, чем на суше. Совершенно ясно, например, что на суше особую роль играет почвообразование и взаимоотношение между почвами и стоком; в водоемах же морского и озерного типа особую роль играет концентрация элементов в донных отложениях в зависимости от условий втока, климата и от характера биологической продуктивности и состава биоценозов водоема.

11. Биогеоценологическое исследование водоемов имеет особое значение и в связи с чисто практическими вопросами. Как известно, промышленная деятельность человека связана с образованием весьма больших масс сточных вод, часто в очень сильной степени загрязненных продуктами отхода различных производств; в последнее время среди таких продуктов все более важное место начинают занимать радиоактивные изотопы В связи с этим перед экспериментальной биогеоценологией водоемов встают специальные задачи, связанные с радиоактивным загрязнением природных вод и возможными методами их биологической очистки и дезактивации.

12. В нашей лаборатории в течение последних лет проводятся опыты по экспериментальной биогеоценологии с применением метода меченых атомов и воздействия на сообщества живых организмов ионизирующими излучениями (Тимофеев-Ресовский, Порядкова, Сокурова и Тимофеева-Ресовская, 1957). В части этих опытов используются специальные грядки и большие ящики, засеянные определенными фитоценозами; в них изучается как действие излучений и излучателей на биомассу и структуру фитоценозов, так и влияние растительного покрова на миграцию элементов в почве. Другая же часть опытов производится в пресноводных водоемах разных размеров, от аквариумов до небольших прудов. В этих

опытах изучаются действие излучений и излучателей на пресноводные организмы и некоторые пресноводные биоценозы (например, перифитон), коэффициенты накопления некоторых химических элементов из водных растворов различными грунтами и видами водных организмов, сорбция и десорбция элементов из воды грунтами и мутями, распределение рассеянных и микроэлементов по косным и живым компонентам водоемов и степень очистки и дезактивации воды, проходящей через слабо проточные водоемы. Принимая во внимание теоретические и практические соображения, упомянутые в пунктах 10 и 11 настоящей статьи, исследования, связанные с биогеоценологическим изучением водоемов, будут публиковаться в особой серии. В этой серии будут напечатаны упомянутые работы по сорбции и десорбции элементов грунтами и мутями, определение коэффициентов накопления различных элементов разными видами пресноводных организмов, по распределению и балансу вносимых в водоем элементов и по биологической очистке и дезактивации слабо проточных вод.

ЛИТЕРАТУРА

Бауер Х и Тимофеев-Ресовский Н. В. (Timoféeff-Ressovsky N. W. u. Bauer H.). Genetik- und Evolutionsforschung bei Tieren. Die Evolution der Organismen, verl. G. Fischer. Jena, 1943.

Берг Л. С. Фации, географические аспекты и географические зоны. Изв. ВГО, 1945, т. 7.

Вернадский В. И. Химические элементы и механизм земной коры. «Природа», 1922, т. 11, № 3—5.

Вернадский В. И. Ход жизни в биосфере. «Природа», 1925, т. 14, № 10—12.

Вернадский В. И. Биосфера. Л., Н. Х—Т., 1926.

Вернадский В. И. Очерки геохимии. Л., Гос. н.-т. изд-во, 1934.

Вернадский В. И. О некоторых основных проблемах биогеохимии. Изв. АН СССР, серия геол., 1938, т. 18.

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

Вернадский В. И. О геологических оболочках Земли, как планеты. Изв. АН СССР, серия геогр., 1942, т. 6.

Вернадский В. И. Несколько слов о неосфере. «Успехи совр. биол.», 1944, т. 8.

Виноградов А. П. Геохимия живого вещества. Л., Изд-во АН СССР, 1933.

Виноградов А. П. Химический элементарный состав организмов моря, ч. 1—3. Тр. Биогеохимической лаборатории АН СССР, 1935—1944, т. 3, 4 и 5.

Виноградов А. П. Геохимия и биогеохимия. «Успехи химии», 1938, т. 7.

Виноградов А. П. Изучение биогеохимических провинций, Вестн. АН СССР, 1939, № 10.

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

Виноградов А. П. Геохимия редких и рассеянных элементов в почвах. М., Изд-во АН СССР, 1950.

Гептнер В. Г. Общая зоогеография. М., Биомедгиз, 1936.

Зенкевич Л. А. Фауна и биологическая продуктивность моря. М., Изд-во «Сов. наука», 1947—1951, т. 1, 2.

Зенкевич Л. А. Моря СССР, их фауна и флора. М., Изд-во «Сов. наука», 1950.

Зенкевич Л. А. Комплексный метод в изучении биологических процессов в водоемах. Тр. Всес. гидробиол. об-ва, 1953, т. 5.

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

Исаченко А. Г. Основные вопросы физической географии. Л., Изд. ЛГУ, 1953.

Лаврен ко Е. М. О фитогеосфере. «Вопросы географии», 1949, сб. 15.

Муравейский С. Д. Роль географических факторов в формировании географических комплексов. «Вопросы географии», 1948, сб. 9.

Перельман А. И. Очерки геохимии ландшафта. М., Географгиз, 1955.

Полынов Б. Б. Геохимические ландшафты. «Вопросы геохимии и петрогр.». М.— Л., Изд-во АН СССР, 1946.

Сукачев В. Н. Растительные сообщества. Л., 1928.

Сукачев В. Н. О принципах генетической классификации в биогеоценологии. Журн. общ. биол., 1944, т. 5.

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

Сукачев В. Н. Основы теории биогеоценологии. Юбилейный сб. «30-летие Вел. Окт. революции». Л., Изд-во АН СССР, 1947, т. 2.

Сукачев В. Н. Фитоценология, биогеоценология и биогеография. Тр. 2-го Всес. геогр. съезда, 1948, т. 1.
Сукачев В. Н. О соотношении понятий географический ландшафт и биогеоценоз. «Вопросы географии», 1949, сб. 16.
Сукачев В. Н. (руков.) и др. Предварительные программы стационарных комплексных биогеоценологических исследований. «Землеведение», 1950, Нов. серия, т. 3.
Тимофеев-Ресовский Н. В. (Timoféeff-Ressovsky N. W.). Genetik und Evolution. Z. ind. Abst. Vererbl., 1938.
Тимофеев-Ресовский Н. В. (Timoféeff-Ressovsky N. W.). Mutations and Geographical variation. The New Systematics. Oxford, 1940.
Тимофеев-Ресовский Н. В., Порядкова Н. А., Сокурова Е. Н. и Тимофеева-Ресовская Е. А. Работы по экспериментальной биогеоценологии. 1. Влияние излучателей на биомассу и структуру наземных, почвенных и пресноводных биоценозов. Тр. Ин-та биол. УФАН СССР, вып. 9. Свердловск, 1957.
Титов И. А. Взаимодействие растительных сообществ и условий среды. М., Изд-во «Сов. наука», 1952.
Ферсман А. Е. Геохимия, т. 1—4. Изд. ОНТИ, 1933—1939.

А К А Д Е М И Я Н А У К С С С Р
У Р А Л Ь С К И Й Ф И Л И А Л

Вып. 12 ТРУДЫ ИНСТИТУТА БИОЛОГИИ 1960

Е. А. ТИМОФЕЕВА-РЕСОВСКАЯ и Н. В. ТИМОФЕЕВ-РЕСОВСКИЙ

РАСПРЕДЕЛЕНИЕ РАССЕЯННЫХ ЭЛЕМЕНТОВ ПО КОМПОНЕНТАМ ВОДОЕМОВ

II. ПОЧВЕННО-БИОЛОГИЧЕСКАЯ ДЕЗАКТИВАЦИЯ ВОДЫ В ПРУДАХ-ОТСТОЙНИКАХ

ВВЕДЕНИЕ

Изучение попадающих в воду радиоактивных веществ, их распределение по живым и неживым компонентам водоемов представляет большой практический интерес в связи со значительным расширением в последнее время работ с большим количеством различных излучателей. Одновременно с этим исследование миграции, распределения и концентрации рассеянных и редких элементов в биосфере имеет серьезное теоретическое значение. Нам важно иметь, с одной стороны, точное представление о конечной судьбе радиоактивных загрязнений, попадающих в естественные водоемы и о соотношении между активностями воды, грунтов и живых организмов, а с другой стороны, попытаться разрешить очень актуальную проблему дезактивации вод, загрязненных излучателями.

В течение последних десятилетий рядом исследователей в различных лабораториях производились довольно точные анализы элементарного состава морской воды и разнообразных морских организмов (Виноградов, 1929—1944; Зенкевич, 1951; Зернов, 1949). Эти анализы показали, что в то время, как океаническая вода обладает весьма постоянным составом входящих в нее элементов, концентрация различных химических элементов в разных группах и видах морских организмов очень сильно варьирует. Так, многие химические элементы, находящиеся в морской воде в ничтожно малых количествах, содержатся в морских организмах в десятки, сотни, тысячи и даже десятки тысяч раз бóльших концентрациях. Из этого следует, что живые организмы способны в значительной мере концентрировать, или накапливать в своем теле, рассеянные или редкие элементы, присутствующие в окружающей среде в ничтожных количествах. Это же свойство живых организмов было установлено Вернадским и его сотрудниками путем тщательного сравнения концентраций естественно-радиоактивных элементов в воде пресных водоемов и в некоторых из населяющих их организмов (Вернадский, 1923—1940; Вернадский и Виноградов, 1931; Виноградов, 1929; Броуновский, 1932; Броуновский и Кунашева, 1935).

Подобные наблюдения были произведены и в нашей лаборатории при изучении методом меченых атомов накопления организмами различных

радиоактивных изотопов, вносимых в определенных концентрациях в воду аквариумов. В этих опытах было исследовано поглощение самых различных излучателей (стронций, иттрий, цирконий, ниобий, рутений, цезий, церий, раствор из смеси осколков урана, содержащий в основном вышеперечисленные элементы, а также радиоактивные изотопы фосфора, серы, цинка, железа и кобальта) и для различных групп пресноводных организмов найдены относительно высокие коэффициенты накопления (от 100 до 10 000). «Коэффициентом накопления» мы называем отношение между концентрациями данного элемента в соответствующем организме и в воде. Таким образом, водные организмы, особенно планктон и перифитон, а также детрит, образующийся в результате отмирания и распада различных водных организмов, являются весьма эффективными дезактиваторами воды.

В этих же опытах, основной задачей которых было установление коэффициентов накопления тех или иных излучателей различными компонентами биомассы, была также установлена высокая степень сорбции радиоактивности грунтами аквариумов, что, в свою очередь, потребовало более детального изучения степени сорбции радиоактивности различными песчаными и почвенными фильтрами. Соответствующие опыты показали, что при помощи почвенно-песчаных фильтров действительно можно весьма сильно дезактивировать пропускаемые через них растворы; при этом степень дезактивации, в зависимости от типа фильтров и входящих в раствор элементов, варьирует в пределах от 80 до 99%.

На основании установления коэффициентов накопления рассеянных элементов пресноводными организмами и лабораторных опытов с почвенными фильтрами естественно возникла мысль о возможности применения тех или иных почвенно-биологических методов дезактивации различных сточных вод, содержащих слабые концентрации (до нескольких десятков микрокюри на литр) различных излучателей (например, осколков урана). Для испытания возможности почвенно-биологической дезактивации воды весной 1952 г. нами были устроены две наружные установки, состоящие каждая из почвенного фильтра и небольшого пруда-отстойника; через два года, кроме того, была устроена серия из трех связанных друг с другом прудов без фильтра.

В настоящем сообщении приводятся результаты всех опытов, проведенных на этих установках до настоящего времени. Конечно, данные опыты следует рассматривать как предварительные, выясняющие принципиальную возможность и порядки величин дезактивации воды этим способом. В будущем такие опыты должны проводиться в более широком масштабе и с учетом в фильтрах и водоемах судьбы отдельных элементов.

За помощь в проведении опытов авторы выражают искреннюю благодарность Л. Сычевой и Л. Мошкиной. За организацию описанных ниже опытов и существенную помощь при обсуждении полученных результатов они выражают глубокую благодарность А. К. Уральцу.

МАТЕРИАЛ И МЕТОДИКА

Опыты проводились с тремя наружными установками. Две первые состояли каждая из резервуара, почвенного фильтра и пруда-отстойника; фильтр в первой был расположен перед прудом, а во второй — за прудом. Схема этих двух установок изображена на рис. 1, в верхнем ряду; на рис. 2 приведены фотографии первой *(а)* и второй *(б)* установок.

Резервуары, из которых ежесуточно спускался в пруд или в фильтр раствор излучателей, представляли собой эмалированные ванны емкостью около 350 л; сток из них регулировался краном на трубке, приделанной к обычному сточному отверстию ванны, защищенному от механических загрязнений металлической сеткой. На конце сточной трубки помещалось

крестообразное дождевальное устройство с маленькими отверстиями, чтобы избежать размывания почвы при подаче раствора на фильтр сильной струей.

Почвенные фильтры представляли собой круглые баки из оцинкованного железа с нижним боковым стоком, изнутри защищенным от механических загрязнений частой металлической сеткой и снабженным сточной трубкой с краном. Высота баков равнялась примерно 100, а диаметр 60 см. На дно фильтров помещался в качестве дренажа слой из мелких камешков и крупного гравия толщиной в 20 см, а поверх него смесь из равного

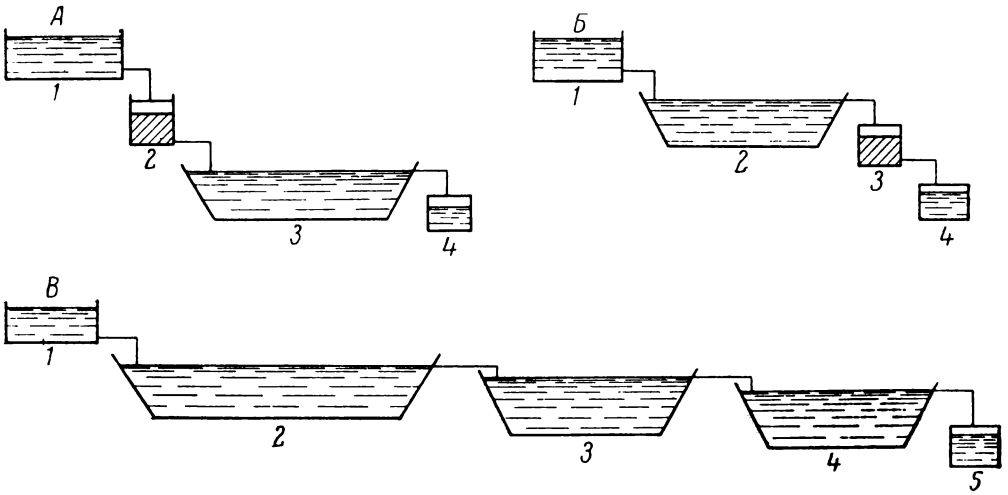


Рис. 1. Схема установок

А — первая установка: *1* — резервуар; *2* — фильтр; *3* — пруд; *4* — сточная яма; *Б* — вторая установка: *1* — резервуар; *2* — пруд; *3* — фильтр; *4* — сточная яма; *В* — третья установка: *1* — резервуар; *2* — первый пруд; *3* — второй пруд; *4* — третий пруд; *5* — сточная яма

количества огородной почвы и озерного песка. Объем почвенно-песчаного фильтра в первой установке составил примерно 125, а во второй — 100 л.

Пруды представляли собой гидроизолированные бассейны площадью 8 × 8 м и емкостью около 30 куб. м. Грунт состоял из слоя озерного песка толщиной около 20 см с тонкой прослойкой почвы. Пруды были засажены прибрежными подводными и плавающими растениями; через некоторое время после наполнения водой в них развились типичные для небольших прудов фауна, флора, планктон и бентос. Пруды были снабжены верхним стоком, защищенным металлической сеткой, через который излишек воды стекал в градуированные оцинкованные баки с нижним краном; стекавшая в такой бак за сутки вода измерялась и затем спускалась в яму, из которой фильтровалась в почву.

В первой установке раствор поступал из ванны в количестве 250 л в сутки в почвенный фильтр, а из него в пруд; из пруда через вышеупомянутый градуированный бак (в котором измерялся ежесуточный сток) вода спускалась в яму. Пробы воды для измерения радиоактивности брались из ванны, при стоке из фильтра, из пруда и при стоке из пруда.

Вторая установка отличалась от первой тем, что раствор из ванны, в количестве 300 л в сутки, поступал прямо в пруд, а избыточная вода из пруда по верхнему стоку стекала в такой же фильтр, как в первой установке; из фильтра вода поступала в градуированный бак, в котором ежесуточно промерялась и спускалась в яму. Пробы для измерения радиоактивности брались из ванны, из пруда, при стоке из пруда в фильтр и при стоке из фильтра в бак.

Рис. 2. Фотографии первой (*а*) и второй (*б*) установок

Все пробы воды, объемом 0,5 куб. см, выпаривались на стандартных алюминиевых тарелочках и просчитывались на счетной установке «Б». Примерно каждые две недели из прудов брались пробы грунта и растений для определения в них концентрации радиоактивных веществ после соответствующей обработки (высушивание, взвешивание, приготовление аликвотной пробы).

Во всех опытах на этих установках употреблялся выдержанный раствор осколков урана концентрацией 25 мккюри/л по β-излучению.

Третья установка состояла из трех таких же прудов, соединенных стоком; но в ней отсутствовал почвенный фильтр. Первый пруд (объем — 21 куб. м) был несколько больше двух остальных (по 14 куб. м); таким образом, объем воды во всей серии составлял около 50 куб. м. В первый пруд раствор поступал из бака (емкостью более 1 куб. м) в количестве 1000 л в сутки. На рис. 1, в нижнем ряду, изображена схема третьей установки. Концентрация неразделенного раствора осколков урана составляла в этом опыте 10 мккюри/л по β-излучению. В опытах этой серии пробы воды брались при стоке из бака, из прудов и при стоке из каждого пруда. Дважды в месяц из всех прудов брались пробы грунтов и водной растительности для определения в них концентрации радиоактивных веществ.

РЕЗУЛЬТАТЫ ОПЫТОВ

В настоящем сообщении будут описаны отдельно результаты трехлетних опытов на двух первых установках, опытов с серией из трех прудов и данные измерений радиоактивности по вертикальным слоям почвенных фильтров, в грунтах и биомассе прудов.

1. Установка из почвенного фильтра и пруда

Ниже описаны результаты работ первого и двух последующих сезонов.

Опыты первого сезона

Наши наружные установки, состоящие из резервуаров, фильтров и прудов-отстойников, а также их общий ход работы за три месяца, с 1 июля по 1 октября 1952 г., описаны в предыдущем разделе. В первой установке раствор (концентрацией $2{,}5 \cdot 10^{-5}$) из ванны поступал ежедневно в количестве 250 л в почвенный фильтр, из него в пруд-отстойник, а из пруда вытекал в градуированный бак, в котором измерялся ежесуточный сток, и затем спускался в яму. В связи с испарением воды с относительно большой поверхности пруда из него вытекало в большинстве случаев заметно меньше воды, чем поступало в пруд. Пробы для измерения радиоактивности воды брались из ванны, при выходе из фильтра, из пруда в восьми местах (из четырех углов, с поверхности и с глубины в центре пруда, вблизи места втока и места стока из пруда) и из воды, вытекавшей из пруда. Измерение количества втекавшей и вытекавшей воды и определение радиоактивности во всех выше перечисленных местах позволяло провести полный баланс ее за время работы установки, а также установить степень дезактивации исходного раствора как фильтром, так и прудом.

На рис. 3 представлена кривая работы фильтра. Довольно заметные колебания процента пропускаемой фильтром радиоактивности несомненно связаны с соответствующими колебаниями скорости фильтрации, которая в данном случае точно не измерялась. Всего через этот фильтр прошло около 200 объемов; в среднем за это время он пропускал 6,9% исходной радиоактивности, не показывая еще никаких признаков насыщения.

В табл. 1 приведены результаты измерения радиоактивности в воде пруда, бравшейся в разное время из восьми ранее перечисленных мест.

Таблица 1

Результаты измерения радиоактивности воды из восьми различных мест пруда первой установки (в % от исходной)

Дата	Место взятия пробы								
	у втока	первый угол	второй угол	центр с поверхности	центр с глубины	третий угол	четвертый угол	у стока	в середине
3—7/VII	0,24	0	0	0	0	0	0	0	0,02
8—14/VII	0,14	0,17	0,12	0,12	0,17	0,14	0,2	0,1	0,14
15—22/VII	1,6	0,6	0,5	0,4	0,3	0,5	0,44	0,5	0,61
23/VII—3/VIII	0,85	0,6	0,8	0,65	0,81	0,7	0,8	0,85	0,76
4—11/VIII	0,59	0,8	0,8	1,0	1,0	0,7	1,5	0,9	0,91
12—18/VIII	1,4	1,2	1,3	1,1	0,9	1,4	1,5	1,2	1,2
19—25/VIII	2,3	1,47	1,8	1,7	1,75	1,75	1,75	1,4	1,74
26—31/VIII	1,6	1,78	1,6	1,9	1,7	1,6	2,1	1,76	1,75
1—8/IX	1,8	2,6	1,5	1,4	1,3	2,3	1,9	1,7	1,81
9—14/IX	2,2	1,8	1,8	2,7	1,7	1,9	7,3	1,8	7,1
15—22/IX	2,3	1,88	1,96	1,83	2,38	2,02	2,38	7,26	2,1
23—29/IX	2,0	1,9	2,16	1,8	2,2	1,9	2,5	2,14	2,1
30/IX	1,7	2,2	2,2	2,1	2,1	2,3	2,8	2,2	2,2
В среднем	1,35	1,24	1,19	1,11	1,19	1,24	1,5	1,21	1,3

Только в самом начале наблюдалось практически полное отсутствие радиоактивности в местах, удаленных от втока; очень быстро благодаря ветровой и термической циркуляции воды разница сгладилась. В среднем,

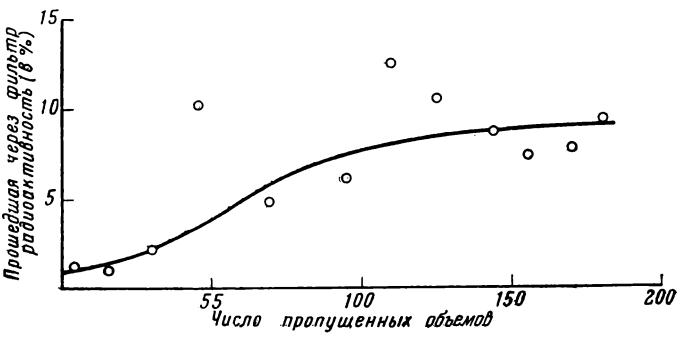


Рис. 3. Кривая работы фильтра первой установки

как видно из последней горизонтальной графы таблицы, между отдельными местами пруда заметной разницы в радиоактивности воды нет. Конечно, с течением времени активность воды пруда несколько возрастала, что видно из последней вертикальной графы таблицы, однако, это возрастание шло значительно медленнее поступления ее в пруд. Таким образом, из фильтра в пруд поступало в среднем около 7%, из пруда же вытекало 0,2—1,8% исходной радиоактивности. Общий баланс радиоактивности первой установки приведен в табл. 2.

Таблица 2

Общий баланс радиоактивности (в % от исходной и вышедшей из фильтра) за время работы первой установки в течение первого сезона

Распределение радиоактивности	Количество радиоактивности		
	мкюри	по отношению к исходной (в %)	по отношению к вышедшей из фильтра (в %)
Поступило в установку	490,0	100,0	—
Поглощено фильтром	451,6	92,0	—
Поглощено грунтом и биомассой	18,3	3,8	47,4
Содержится в воде	16,5	3,5	43,6
Вытекло из пруда	3,6	0,7	9,0

Из таблицы видно, что всего за три месяца в установку поступило 490 мкюри раствора осколков урана, поглощено фильтром 451,6 мкюри, содержится в воде 16,5 мкюри, поглощено живыми и косными компонентами пруда 18,3 мкюри и вытекло из пруда только 3,6 мкюри, или около 0,7% вошедшей в установку радиоактивности. Для ориентировочного определения селективности сорбции различных элементов из раствора почвенным фильтром и компонентами пруда препараты исходного раствора воды, прошедшей через фильтр, и воды, вытекающей из пруда, повторно промерялись на счетной установке в открытом виде и с тонкой алюминиевой фольгой; исходный раствор дает с фольгой в среднем в 7 раз меньше распадов в минуту, вода, прошедшая через фильтр, в 14 раз меньше, а вода, вытекающая из пруда, в 16 раз меньше. Аналогичные результаты были получены при соответствующих измерениях во второй установке. Таким образом, как почвенный фильтр, так и компоненты пруда преимущественно задерживают элементы с жестким β-излучением.

Во второй установке такой же раствор из ванны спускался прямо в пруд в количестве 350 л в день, а уже из пруда вода стекала в почвенный фильтр и, пройдя через него, вытекала в яму. Измерения количества воды и ее активности производились так же, как и в первой установке; всего через вторую установку было пропущено 240 объемов.

В табл. 3 приведены результаты измерения радиоактивности воды из разных мест пруда в разное время.

В этом случае наблюдается та же картина, что и в первой установке, т. е. отсутствие заметной разницы в радиоактивности воды из разных мест пруда и некоторое повышение ее со временем, с тем, понятно, отличием, что абсолютная активность воды во втором пруде выше, чем в первом, так как раствор не прошел еще через почвенный фильтр.

На рис. 4 приведена кривая работы фильтра. Этот фильтр, через который по сравнению с фильтром первой установки проходил раствор значительно более слабой концентрации, поглощал около 88% поступившей в него радиоактивности, т. е. несколько меньше, чем фильтр первой установки (поглощавший около 93%). Несколько меньшая сорбция во втором фильтре понятна, если вспомнить, что ориентировочные промеры жесткости излучения из разных мест первой установки показали, что как почвенный фильтр, так и пруд понижают среднюю жесткость излучения, т. е. преимущественно поглощают и пропускают, по-видимому, одни и те же элементы из раствора осколков урана.

В табл. 4 приведен общий баланс работы второй установки за описываемый период. Всего поступило в установку — 575 мкюри, поглощено живыми и косными элементами пруда 528 мкюри, содержится в воде

Таблица 3

Результаты измерения радиоактивности воды из восьми различных мест пруда второй установки (в % от исходной)

Дата	Место взятия пробы								
	у втока	первый угол	второй угол	центр поверхности	центр с глубины	третий угол	четвертый угол	у стока	в середине
3—7/VII	1,4	1,2	1,05	1,8	1,7	1,3	1,4	1,4	1,4
7—14/VII	3,6	3,7	3,1	3,4	3,5	2,8	4,1	2,7	3,4
15—22/V	5,2	3,5	4,3	4,4	2,9	4,2	3,2	3,2	3,8
23/VII—3/VIII	4,8	3,1	3,6	3,4	2,8	4,7	3,5	3,2	4,2
4—11/VII	4,3	3,9	0,4	3,9	4,2	3,1	3,9	4,0	3,9
12—25/VII	6,3	4,9	5,2	4,5	4,7	5,4	6,2	6,1	5,4
26—31/VIII	5,3	6,1	5,8	5,6	6,8	5,5	6,3	6,0	5,9
1—8/IX	4,5	4,2	4,2	5,3	5,7	4,1	4,1	3,9	4,5
9—14/IX	4,4	4,0	4,5	5,6	3,4	4,5	4,2	5,0	4,5
15—22/IX	4,1	4,1	5,15	4,8	5,9	4,4	4,8	4,1	4,7
23—29/IX	5,6	3,9	4,2	4,5	4,3	6,2	5,0	4,4	4,8
30/IX	2,8	6,0	4,4	3,6	5,2	5,3	5,0	4,0	4,6
В среднем	4,4	4,1	4,2	4,1	4,3	4,3	4,4	4,2	4,3

37,1 мкюри, поступило в фильтр 8,7 мкюри и вытекло из установки 1,2 мкюри радиоактивности; таким образом, из установки вышло лишь около 0,2% вошедшей в нее радиоактивности.

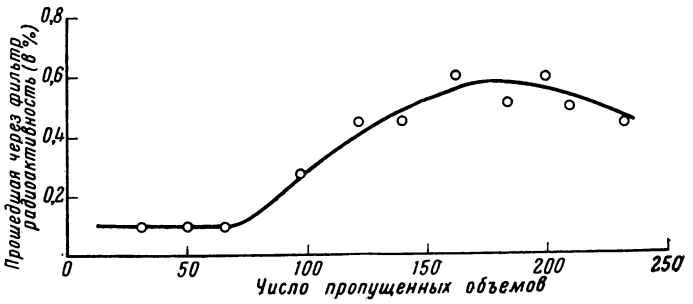


Рис. 4. Кривая работы фильтрата второй установки

Таким образом, обе установки, отличающиеся последовательностью в расположении почвенного фильтра и пруда-отстойника, дали вполне удовлетворительные результаты. За три месяца работы через них было пропущено примерно 200—250 объемов; при этом не было замечено ни следов типичного «проскока», т. е. насыщения фильтров, ни заметного понижения скорости фильтрации сквозь почвенные фильтры. Необходимо отметить, что, несмотря на большую разницу в концентрации растворов излучателей, поступивших в первый и второй фильтры, последние пропускали примерно одинаковое количество радиоактивности. Из этого следует, что процент пропускаемой фильтром радиоактивности в довольно широких пределах (порядка 10^{-6}—10^{-5} мкюри/л) мало зависит от исходной концентрации, из чего в свою очередь можно заключить, что некоторые элементы из раствора осколков урана, по-видимому, слабо сорбируются, в то время как другие задерживаются более или менее полностью.

В пределах изученного пока отрезка времени и количеств пропущенного через установки раствора (по отношению к объемам фильтра и

Таблица 4

Общий баланс радиоактивности (в % от исходной и к вышедшей в фильтр) за время работы второй установки в течение первого сезона

Распределение радиоактивности	Количество радиоактивности		
	мкюри	по отношению к исходной (в %)	по отношению к вышедшей в фильтр (в %)
Поступило в установку	575,0	100,0	—
Поглощено грунтом и биомассой	528,0	92,0	—
Содержится в воде . . .	37,1	6,3	—
Поглощено фильтром . .	8,7	1,5	87,8
Вытекло из фильтра . .	1,2	0,2	12,2

пруда) последовательность в расположении фильтра и пруда особой роли не играет; при расположении фильтра после пруда результаты получились даже несколько лучшие (вторая установка пропустила 0,2% исходной радиоактивности, тогда как первая — 0,7%). Лишь дальнейшие длительные опыты могут показать, в какой мере более быстрое повышение радиоактивности воды в пруду, расположенном до фильтра, повлияет на степень «биологической очистки» воды прудом.

Опыты двух последующих сезонов

В следующем году опыты были продолжены.

В течение зимы, следовавшей после первого сезона работы, пруд-отстойник первой установки электрически обогревался. Из этого пруда систематически (два раза в месяц) брались пробы воды для измерения радиоактивности. В середине мая радиоактивность всей воды пруда составляла около 4 мкюри. За несколько дней до начала опытов в пруд было добавлено около 31 мкюри раствора осколков урана из остатков после замачивания семян для агробиологических опытов. Таким образом, в воде пруда первой установки перед началом опытов было около 35 мкюри. Методика проведения опыта была та же, что и в предыдущем году, т. е. ежедневно в ванну подавался раствор осколков урана концентрацией 25 мккюри/л в количестве 250 л. Из ванны раствор поступал на фильтр, из последнего в пруд, затем в измерительный бак и, наконец, в яму. Всего было пропущено около 200 объемов. Так как прошлогодние измерения радиоактивности воды в разных местах пруда давали примерно одинаковые цифры, в этом году ежедневно бралось по две пробы из середины пруда с поверхности, из ванны, при выходе из фильтра и при выходе из пруда. Для составления баланса радиоактивности и характеристики работы отдельных узлов первой установки было подсчитано количество излучателей, поглощенное фильтром и компонентами пруда, и оставшееся в воде. Результаты этих подсчетов представлены в табл. 5.

Как явствует из таблицы, в пруд поступило из фильтра в среднем около 604 мкюри раствора осколков урана, фильтр поглотил 548,6 мкюри, грунт и биомасса — 36,8 мкюри, осталось в воде 13,4 мкюри и, наконец, вытекло из пруда 5,2 мкюри, т. е. вышло из установки около 0,8% поступившей в нее радиоактивности. В табл. 6 приведен такой же баланс для пруда в процентах от содержавшейся в нем до начала опыта и поступившей в него из фильтра радиоактивности. Из таблицы видно, что 66,4% поглотили грунт и биомасса пруда, 24,2% находилось в воде и 9,4% вышло из пруда.

Таблица 5

Общий баланс радиоактивности за время работы первой установки в течение второго сезона (в % от суммы радиоактивности, впущенной на фильтр и оставшейся от прошлого сезона)

Распределение радиоактивности	Количество радиоактивности		
	мкюри		%
Поступило на фильтр — остаток от сезона 1952 г.	569,0 35,0	604	100,0
Поглотилось фильтром	548,6		91,0
Поглотилось грунтом и биомассой	36,8		6,1
Содержится в воде	13,4		2,1
Вытекло из пруда	5,2		0,8

Таблица 6

Общий баланс радиоактивности за время работы пруда первой установки в течение второго сезона (в % от оставшейся от прошлого сезона и прошедшей через фильтр)

Распределение радиоактивности	Количество радиоактивности		
	мкюри		%
Прошло через фильтр + остаток от сезона 1952 г.	20,5 35,0	55,5	100,0
Поглотилось грунтом и биомассой	36,8		66,4
Содержится в воде	13,4		24,2
Вытекло из пруда	5,2		9,4

Вторая установка в течение зимнего сезона не обогревалась. Измерение радиоактивности воды этого пруда производилось весной, после его оттаивания; к середине мая в воде содержалось около 8 мкюри. Сравнение степени дезактивации воды за зиму в первом (обогреваемом) и втором (необогреваемом) прудах приведено в табл. 7.

Таблица 7

Дезактивация воды первого и второго пруда за зиму 1952/53 г.

Пруд	Количество радиоактивности (в мкюри)		Дезактивация воды (в %)
	осенью 1952 г.	весной 1953 г.	
1-й	16,5	4,0	24,2
2-й	37,1	8,0	21,6

Из таблицы видно, что вода в обоих прудах за зимний период дезактивировалась почти в одинаковой степени. Как и в пруд первой установки, во второй пруд перед началом работы этого сезона было слито около 132 мкюри раствора осколков урана, оставшегося после замачивания семян для агробиологических опытов; к началу работы в воде этого пруда

находилось, таким образом, около 140 мкюри радиоактивности. Начиная с 15 мая в пруд ежедневно подавалось по 300 л раствора осколков урана концентрацией 25 мккюри/л. Из пруда вода стекала на фильтр, а из фильтра — в градуированный бак и в яму. Всего было пропущено около 250 объемов фильтра. Пробы для определения радиоактивности и составления баланса ее брались так же, как и из первой установки.

Общий баланс радиоактивности за время работы второй установки в этом сезоне показан в табл. 8. В ней приведен баланс в процентах от общей радиоактивности (оставшейся в воде к началу работы и поступившей

Таблица 8

Общий баланс радиоактивности за время работы второй установки в течение второго сезона (в % от суммы впущенной и оставшейся от прошлого сезона)

Распределение радиоактивности	Количество радиоактивности	
	мкюри	%
Поступило в пруд + остаток от сезона 1952 г.	590 + 140 = 730,0	100,0
Поглотилось грунтом и биомассой	646,0	88,5
Содержится в воде	53,3	7,3
Поглотилось фильтром	20,3	2,8
Вытекло из пруда	10,4	1,4

в пруд за этот сезон). Из таблицы видно, что основное количество радиоактивности поглотилось грунтом и биомассой (88,5%), в воде осталось 7,3%, фильтром поглотилось 2,8% и вытекло из установки 1,4%. В табл. 9 приведен баланс по фильтру в процентах от поступившей в него радиоактивности; из таблицы видно, что фильтр в этом году работал плохо, поглотив 66,3% и пропустив 33,7% поступившей в него радиоактивности.

Таблица 9

Баланс радиоактивности (в % от поступившей) за время работы фильтра второй установки в течение второго сезона

Распределение радиоактивности	Количество радиоактивности	
	мкюри	%
Поступило на фильтр	30,7	100,0
Поглотилось фильтром	20,3	66,3
Вытекло из фильтра	10,4	33,7

Для наглядности на рис. 5 и 6 в полулогарифмическом масштабе показаны кривые поступления (в числе распадов в минуту) радиоактивности на фильтр, в пруд и выхода ее из установки по неделям; для первой установки (рис. 5) кривая *1* изображает поступление излучателей на фильтр, кривая *2* — в пруд, и кривая *3* — из пруда; для второй установки (рис. 6) — кривые *1, 2, 3* показывают соответственно поступление радиоактивности в пруд, на фильтр и из фильтра. На рис. 7 приведены изменения радиоактивности воды в обоих прудах во времени (в процентах от исходной). Из рисунка видно, что сначала радиоактивность воды в прудах несколько повышается, а затем, примерно к пятой неделе, падает и остается более или менее постоянной. Наконец, на рис. 8 даны кривые погло-

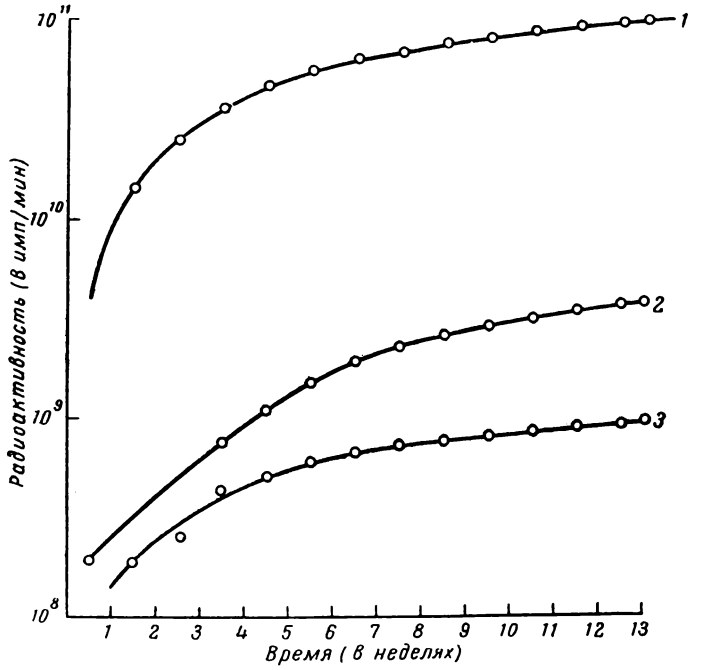


Рис. 5. Кривые работы первой установки

1 — поступило радиоактивности на фильтр; *2* — вышло из фильтра в пруд; *3* — вышло из пруда в бак

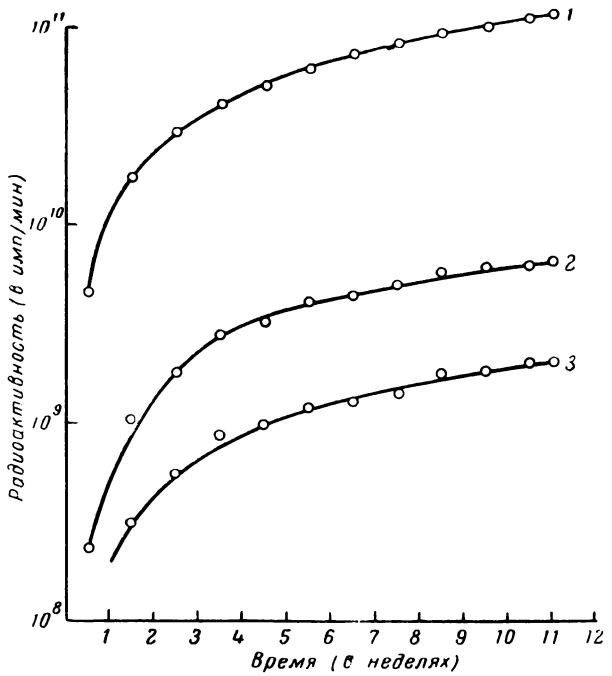


Рис. 6. Кривые работы второй установки

1 — поступило радиоактивности в пруд; *2* — вышло из пруда на фильтр; *3* — вышло из фильтра в бак

щения радиоактивности грунтом и биомассой прудов (в процентах от поступившей в пруд): примерно до седьмой недели процентное поглощение возрастает, а затем остается почти без изменения.

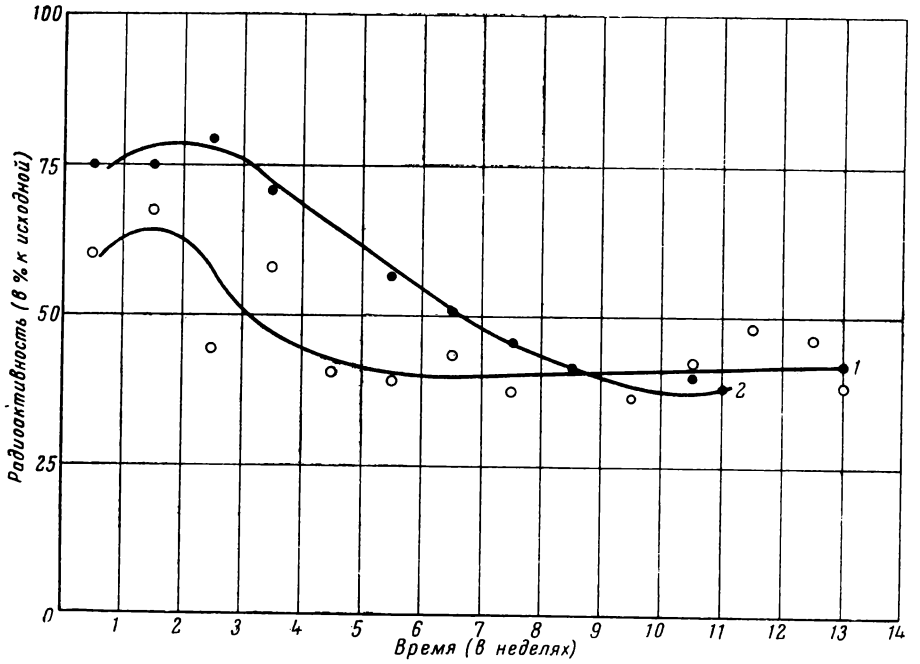


Рис. 7. Кривые относительных изменений радиоактивности воды в прудах первой (*1*) и второй (*2*) установок за второй сезон работы

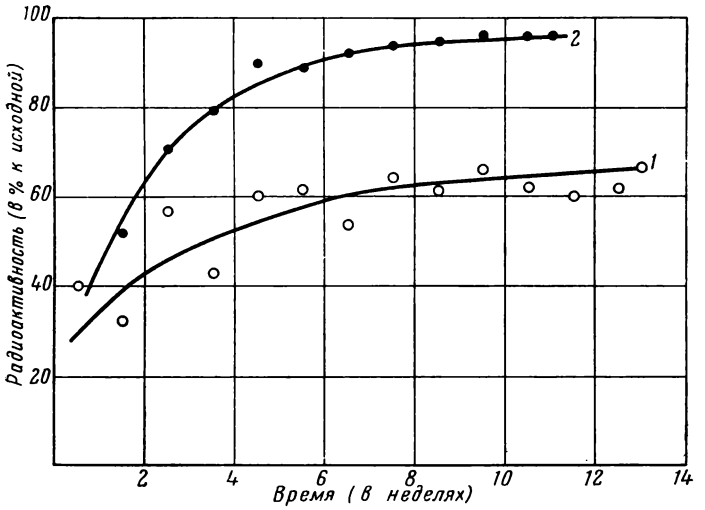


Рис. 8. Кривые поглощения радиоактивности грунтом и биомассой для первой (*1*) и второй (*2*) установок

В конце этого сезона в прудах обеих установок были проведены кратковременные опыты с растворами осколков урана разного возраста и при весьма форсированном режиме.

После окончания описанных опытов фильтры в обеих установках были сняты для постановки новых опытов по определению дезактивации воды

одними прудами-отстойниками. Было поставлено два опыта. В первом изучалась дезактивация прудом второй установки раствора осколков урана возрастом 1,5—2 года при пропускании через пруд ежедневно 1100 л концентрацией около 10 мккюри/л. Во втором опыте изучалась дезактивация прудом первой установки раствора осколков урана возрастом около полугода при пропускании через пруд ежедневно 1000 л концентрацией около 10 мккюри/л.

Опыты по дезактивации воды прудом второй установки были начаты 24 августа 1953 г. и продолжались до 30 сентября 1953 г. До начала опыта вода этого пруда содержала более 40 мкюри. Ежедневно измерялось количество втекающей и вытекающей воды. За все время в пруд поступило 36 000 л раствора и то же количество вытекало из пруда (это объясняется малым испарением из-за прохладной погоды и сравнительно большим количеством осадков). Каждый день бралось по две пробы исходного раствора, воды пруда и воды, вытекающей из него. Для подведения баланса радиоактивности и составления характеристики работы пруда было подсчитано по пятидневкам количество активности в воде, пускаемой в пруд, поглощаемой прудом и вытекающей из него. Результаты этих подсчетов представлены в табл. 10, из которой видно, что поступило в пруд $57{,}3 \cdot 10^9$ имп/мин, в конце опыты в воде пруда было $13{,}2 \cdot 10^9$ имп/мин, а

Таблица 10

Баланс радиоактивности пруда второй установки по пятидневкам за время работы при форсированном режиме (ежесуточная подача 1000 л выдержанного раствора осколков урана концентрацией 10 мккюри/л)

Дата	Количество радиоактивности (в имп/мин)		
	поступило в пруд	содержалось в воде пруда	вытекло из пруда
25—27/VIII — 1953 г.	$5{,}4 \cdot 10^9$	$10{,}0 \cdot 10^9$	$6{,}6 \cdot 10^8$
28/VIII — 2/IX — 1953 г.	$7{,}3 \cdot 10^9$	$8{,}4 \cdot 10^9$	$10{,}8 \cdot 10^8$
3—7/IX — 1953 г.	$6{,}8 \cdot 10^9$	$7{,}4 \cdot 10^9$	$9{,}9 \cdot 10^8$
8—11/IX — 1953 г.	$6{,}8 \cdot 10^9$	$7{,}5 \cdot 10^9$	$8{,}6 \cdot 10^8$
12—17/IX — 1953 г.	$8{,}0 \cdot 10^9$	$8{,}2 \cdot 10^9$	$12{,}7 \cdot 10^8$
18—23/IX — 1953 г.	$8{,}0 \cdot 10^9$	$9{,}5 \cdot 10^9$	$18{,}3 \cdot 10^8$
24—30/IX — 1953 г.	$15{,}0 \cdot 10^9$	$13{,}2 \cdot 10^9$	$22{,}1 \cdot 10^8$
Всего	$57{,}3 \cdot 10^9$	—	$8{,}9 \cdot 10^8$

Таблица 11

Общий баланс радиоактивности (в % от суммы оставшейся и поступившей вновь) за время работы пруда второй установки при форсированном режиме

Распределение радиоактивности	Количество радиоактивности		
	в мкюри		в %
Поступило в пруд + остаток сезона 1953 г.	288 42	330	100,0
Содержится в воде	66		20,0
Поглотилось грунтом и биомассой	220		67,0
Вытекло из пруда	44		13,0

вышло из него $8{,}9 \cdot 10^8$ имп/мин. На основании этих подсчетов в таблице 11 дан общий баланс активности по работе этого пруда. Из табл. 11 видно, что 67% всей поступившей в пруд радиоактивности поглотилось грунтом и биомассой, 20% — осталось в воде и 13% вытекло из пруда.

Второй опыт (с прудом первой установки) был начат 9 сентября 1953 г. и продолжался до 29 октября 1953 г. До начала опытов вода этого пруда содержала 14 мкюри радиоактивности. За все время работы в пруд поступило 36 000 л, вытекло то же количество. Так же как и в первом опыте, каждый день бралось по две пробы исходного раствора, воды пруда и воды, вытекающей из него. Для подведения баланса радиоактивности и составления характеристики работы пруда было подсчитано по пятидневкам количество ее в воде, пускаемой в пруд, поглощаемой прудом и вытекающей из него. Результаты этих подсчетов приведены в табл. 12.

Из табл. 12 видно, что за время опыта в пруд поступило $60{,}0 \cdot 10^9$ имп/мин, в конце опыта в нем осталось $13{,}3 \cdot 10^9$ имп/мин и вытекло из пруда $9{,}6 \cdot 10^8$ имп/мин.

Таблица 12

Баланс радиоактивности пруда первой установки за время работы при форсированном режиме (ежесуточная подача 1000 л более «свежего» раствора осколков урана концентрацией в 10 мкюри/л)

Дата	Количество радиоактивности (в имп/мин)		
	поступило в пруд	содержалось в воде пруда	вытекло из пруда
10—16/IX — 1953 г.	$7{,}6 \cdot 10^9$	$7{,}6 \cdot 10^9$	$6{,}9 \cdot 10^8$
17—22/IX — 1953 г.	$7{,}5 \cdot 10^9$	$8{,}9 \cdot 10^9$	$11{,}6 \cdot 10^8$
23—28/IX — 1953 г.	$7{,}6 \cdot 10^9$	$11{,}7 \cdot 10^9$	$18{,}5 \cdot 10^8$
29/IX — 7/X — 1953 г.	$8{,}8 \cdot 10^9$	$10{,}5 \cdot 10^9$	$13{,}9 \cdot 10^8$
8—13/X — 1953 г.	$8{,}8 \cdot 10^9$	$13{,}2 \cdot 10^9$	$18{,}3 \cdot 10^8$
14—19/X — 1953 г.	$9{,}8 \cdot 10^9$	$13{,}2 \cdot 10^9$	$11{,}1 \cdot 10^8$
20—24/X — 1953 г.	$9{,}8 \cdot 10^9$	$13{,}3 \cdot 10^9$	$15{,}9 \cdot 10^8$
Всего	$60{,}0 \cdot 10^9$	—	$9{,}6 \cdot 10^8$

Общий баланс радиоактивности, составленный на основании приведенных подсчетов, дан в табл. 13.

Таблица 13

Общий баланс радиоактивности (в % от суммы, оставшейся в пруду и поступившей вновь) за время работы пруда первой установки при форсированном режиме

Распределение радиоактивности	Количество радиоактивности		
	в мкюри		в %
Поступило в пруд + остаток от сезона 1953 г.	300 14	314	100,0
Содержится в воде	66		21,0
Поглотилось грунтом и биомассой .	200		64,0
Вытекло из пруда	48		15,0

Из таблицы видно, что 64% всей поступившей в пруд радиоактивности поглотилось грунтом и биомассой, 21% — остался в воде и 15% вытекло из пруда.

Сравнение данных, представленных в табл. 11 и 13, показывает, что результаты работы прудов почти одинаковы — разница в «возрасте» растворов осколков урана никак не повлияла на степень дезактивации. Главная масса радиоактивности в обоих прудах поглощается грунтом и биомассой (около 65%), около 20% остается в воде прудов, а вытекает приблизительно 15%. Полученные результаты можно считать вполне удовлетворительными, так как пруды проработали уже два сезона и тем не менее не обнаружено никаких признаков насыщения, хотя режим работы в этих опытах был весьма форсированным (раствор ежесуточно подавался в количестве, равном, примерно, $^1/_{30}$ емкости прудов).

В течение третьего сезона обе установки работали так же, как и во время первых двух сезонов: ежедневно на фильтр первой подавалось 250 л, а в пруд второй — 300 л выдержанного раствора осколков урана; концентрация раствора равнялась примерно 10 мкюри/л. В каждом случае было пропущено около 200 объемов. Все измерения радиоактивности производились так же, как и в предыдущие годы.

В табл. 14 дан баланс работы первой установки в процентах от радиоактивности, поданной на фильтр и оставшейся в пруду от прошлого года; из таблицы видно, что фильтром задержано 82% исходного количества

Таблица 14

Общий баланс радиоактивности (в % от суммы, впущенной на фильтр и оставшейся от прошлого сезона) за время работы первой установки в течение третьего сезона

Распределение радиоактивности	Количество радиоактивности		
	в мкюри		в %
Поступило на фильтр + остаток от сезона 1953 г.	299 10,5	309,5	100,0
Поглотилось фильтром	253,5		82,0
Поглотилось грунтом и биомассой	19,3		6,2
Содержится в воде	28,6		9,2
Вытекло из пруда	8,1		2,6

излучателей, поглощено грунтом и биомассой пруда 6,2%, осталось в воде 9,2% и вышло из установки 2,6%. В табл. 15 приведен баланс радиоактивности пруда в процентах от суммы, оставшейся от прошлого года и вновь поступившей в него из фильтра; таблица показывает, что около 35% радиоактивности было поглощено грунтом и биомассой, 51% остался в воде пруда и около 14% вышло из пруда.

Таблица 15

Общий баланс радиоактивности (в % от суммы, оставшейся от прошлого сезона и прошедшей через фильтр) за время работы пруда первой установки в течение третьего сезона

Распределение радиоактивности	Количество радиоактивности		
	в мкюри		в %
Прошло через фильтр + остаток от сезона 1953 г.	45,5 10,5	56,0	100,0
Поглотилось грунтом и биомассой	19,3		34,5
Содержится в воде	28,6		51,2
Вытекло из пруда	8,1		14,3

Общий баланс работы второй установки в процентах от суммы радиоактивности, оставшейся от прошлого года и впущенной за этот сезон, приведен в табл. 16. Из таблицы видно, что грунтом и биомассой поглощено 72%, в воде пруда осталось 18,7%, фильтром поглощено 4,3%, а вытекло из установки около 5%.

Таблица 16

Общий баланс радиоактивности (в % от суммы, оставшейся от прошлого сезона и поступившей вновь) за время работы второй установки в течение третьего сезона

Распределение радиоактивности	Количество радиоактивности		
	в мкюри		в %
Поступило в пруд + остаток от сезона 1953 г.	277,4 80,5	357,9	100,0
Поглотилось грунтом и биомассой	257,5		72,0
Поглотилось фильтром	15,5		4,3
Содержится в воде	67,0		18,7
Вытекло из установки	17,9		5,0

В табл. 17 дан баланс работы фильтра в процентах от поступившей в него из пруда радиоактивности.

Таблица 17

Баланс работы фильтра второй установки в течение третьего сезона, выраженный в процентах от поступившей в него радиоактивности

Распределение радиоактивности	Количество радиоактивности	
	в мкюри	в %
Поступило на фильтр	33,4	100,0
Поглотилось фильтром	15,5	46,5
Вытекло из фильтра	17,9	53,5

Из приведенных данных видно, что в третьем сезоне установки, особенно вторая, работали несколько хуже. Это объясняется плохой работой фильтров; пруды же не проявляли еще заметного насыщения.

В приложениях к настоящей работе даны в качестве примера подробные таблицы баланса (по неделям) радиоактивности в обеих установках за второй сезон работы.

Итог трехлетней работы установок

Общий сравнительный баланс радиоактивности за три года работы обеих установок дан в табл. 18. Баланс составлен на основании промеров объемов поступающей в установки и вытекающей из них воды и по измерениям радиоактивности всех взятых проб. Как видно из соответствующих граф этой таблицы, основная масса (около 90%) радиоактивности в первой установке поглощается фильтром; грунт и биомасса пруда поглощают 4—6% исходной радиоактивности, а вытекает из установки около 1%. Во второй установке основная масса ее, около 90%, задерживается грунтом

и биомассой пруда; фильтр поглощает 1,5—4%, а вытекает из установки также около 1% исходной радиоактивности. В последнем сезоне обе установки работали несколько хуже, чем в предыдущие годы, главным образом из-за плохой работы фильтров.

Таблица 18

Общий баланс радиоактивности за три года работы первой и второй установок

Распределение радиоактивности	1-й год				2-й год				3-й год			
	Установка				Установка				Установка			
	первая		вторая		первая		вторая		первая		вторая	
	количество радиоактивности				количество радиоактивности				количество радиоактивности			
	в мкюри	в % исходной	в мкюри	в % исходной	в мкюри	в % исходной	в мкюри	в % исходной	в мкюри	в % исходной	в мкюри	в % исходной
Поступило в установку	490,0	100,0	575,0	100,0	604,0	100,0	730,0	100,0	309,5	100,0	358,0	100,0
Поглощено фильтром	451,6	92,0	8,7	1,5	548,6	91,0	20,3	2,8	253,5	82,0	15,5	4,3
Поглощено грунтом и биомассой	18,3	3,8	529,0	92,0	36,8	6,1	646,0	88,5	19,3	6,2	257,5	72,0
Содержится в воде .	16,5	3,5	37,1	6,3	13,4	2,1	53,3	7,3	28,6	9,2	67,1	18,7
Вытекло из установки	3,6	0,7	1,2	0,2	5,2	0,8	10,4	1,4	8,1	2,6	17,9	5,0

Таким образом, обе установки, из которых в первой почвенный фильтр находился перед прудом, а во второй — за прудом, не различались существенно в смысле эффективности: вытекавшая из обеих установок вода содержала около 1% исходной радиоактивности. Проценты дезактивации воды почвенными фильтрами и прудами также были примерно одинаковы; округляя, можно считать, что как фильтры, так и пруды очищали воду приблизительно на 90%. Некоторая разница, хотя и небольшая, обусловленная последовательностью расположения фильтра и пруда, сводится к тому, что несколько лучше работает первый объект: фильтр в первой и пруд во второй установке. Это объясняется тем, что, как показали измерения средней жесткости β-излучения в исходном растворе и в растворах, вытекающих из фильтров и прудов, как фильтры, так и пруды сорбируют, по-видимому, преимущественно одни и те же элементы из раствора осколков урана. В результате для второго объекта, будь то фильтр или пруд, остается менее «благоприятная» для сорбции смесь элементов.

Несмотря на длительную работу и соответственно большие количества поглощенной радиоактивности, оба пруда не обнаруживали заметных признаков насыщения. Из этого следует, что пруды-отстойники обладают сравнительно большой емкостью поглощения радиоактивных элементов.

2. Серия из трех прудов

В опытах с двумя первыми установками были получены данные, показывающие, что пруды-отстойники дезактивируют воду примерно так же, как почвенные фильтры. Между тем устройство фильтров, как известно, сопряжено с целым рядом неудобств: скорость фильтрации в почвенных фильтрах весьма изменчива, и ее трудно регулировать; емкость фильтров ограничена — после пропускания через них известного количества раствора (хотя и исчисляемого сотнями объемов фильтра) их необходимо сменять; кроме того, они легко забиваются и загрязняются другими примесями,

находящимися в воде, и выходят из строя; наконец, смена почвенных фильтров, особенно в больших установках, требует строгого соблюдения правил и разработки особых мероприятий техники безопасности по захоронению высокоактивной массы отработанного содержимого фильтров.

Исходя из сходства в работе прудов и почвенных фильтров и принимая во внимание большие неудобства последних, мы попытались совсем отказаться от фильтров.

С этой целью для лучшей очистки воды нами была устроена серия из трех прудов, связанных друг с другом стоками, общей емкостью около 50 куб. м, емкость первого пруда составляла около 21, а второго и третьего — по 14 куб. м. Пруды были устроены и заселены совершенно так же, как и пруды двух первых установок. Схема серии из трех прудов изображена в нижней части рис. 1. Из резервуара в первый пруд ежедневно спускалось 1000 л раствора осколков урана концентрацией 10 мккюри/л. Общее количество радиоактивности, поступившее в эту серию прудов, превышало 1 кюри. Для измерения радиоактивности ежедневно брались семь проб из первого пруда (вток, четыре угла, середина и сток) и по две пробы из второго и третьего прудов (середина пруда и сток). Через каждые две недели брались пробы растений и грунта.

В табл. 19 приведен общий баланс радиоактивности за время работы третьей установки. Из таблицы видно, что из первого пруда вытекло лишь около 3% от всей поступившей в него радиоактивности и около 95% было

Таблица 19

Общий баланс радиоактивности за время работы третьей установки (ежесуточная подача 1000 л раствора осколков урана концентрацией 10 мккюри/л)

	Распределение радиоактивности	Количество радиоактивности		
		в мкюри	в % поступившей	в % исходной
1-й пруд	Поступило в 1-й пруд	1043,0	100,0	100,0
	Поглощено грунтом и биомассой	992,1	94,9	94,9
	Осталось в воде	24,2	2,3	2,3
	Вытекло из 1-го пруда во 2-й	29,7	2,8	2,8
2-й пруд	Поступило во 2-й пруд	29,7	100,0	
	Поглощено грунтом и биомассой	3,1	10,4	0,29
	Осталось в воде	7,8	26,3	0,75
	Вытекло из 2-го пруда в 3-й	18,8	63,3	1,79
3-й пруд	Поступило в 3-й пруд	18,8	100,0	
	Поглощено грунтом и биомассой	7,7	41,0	0,74
	Осталось в воде	3,5	18,6	0,33
	Вытекло из 3-его пруда	7,6	40,4	0,72

поглощено грунтом и биомассой. Во второй пруд поступило 2,8%, а в третий — 1,8% исходной радиоактивности; во втором пруду грунтом и биомассой было поглощено лишь около 10%, а в третьем — около 40% поступившей в них радиоактивности. Из третьего пруда вытекло около 0,7% от всего количества поступившей в установку радиоактивности.

Таким образом, работу этой установки можно считать весьма удовлетворительной. То обстоятельство, что второй и третий пруды задерживали радиоактивность значительно хуже, чем первый, объясняется, по-видимо-

му, тем же, что и ухудшение работы пруда в первой и фильтра во второй установке: из смеси осколков урана во второй и третий пруды поступают преимущественно лишь наиболее плохо сорбируемые грунтом и биомассой элементы. Разницу же в поглощении радиоактивности вторым и третьим прудом следует считать случайной.

3. Измерение радиоактивности в фильтрах, грунтах и водных растениях

В этом разделе приведены данные по концентрации радиоактивности в грунтах прудов и в основных видах высшей водной растительности, а также по распределению ее в разных вертикальных слоях почвенных фильтров.

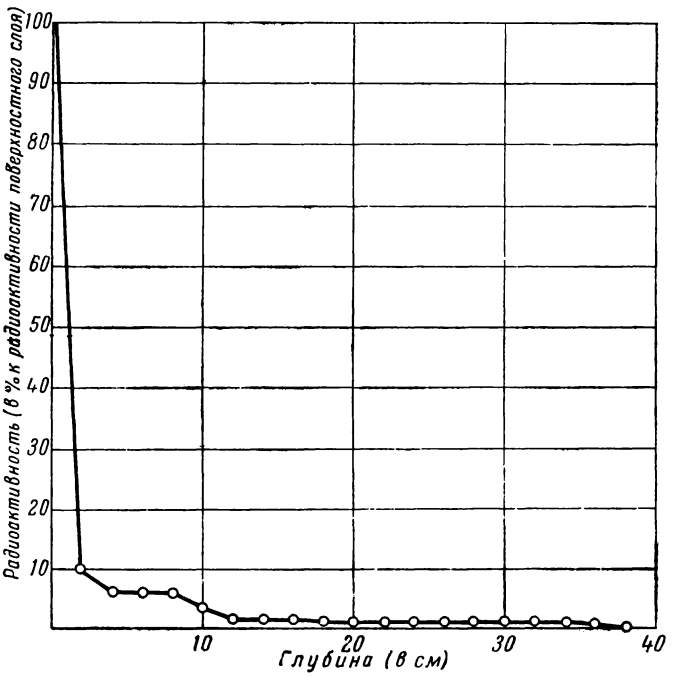


Рис. 9. Распределение радиоактивности по вертикальному разрезу почвенного фильтра первой установки

В двух первых установках, фильтры опоражнивались по окончании сезонных работ. При этом из почвенно-песчаного содержимого фильтров пробы для определения радиоактивности брались через каждые два сантиметра по вертикальному разрезу. Все измерения радиоактивности в фильтрах определенной установки дали принципиально сходные результаты, поэтому здесь будут описаны измерения ее в почве одного из фильтров первой и одного из фильтров второй установки. На рис. 9 и 10 приведены количества радиоактивности, содержащейся в одном грамме сухой почвы каждого вертикального слоя фильтра, в процентах от того же количества в поверхностном слое. По абсциссе расположены слои вертикального разреза фильтра через каждые два сантиметра глубины, а на оси ординат приведена активность слоев в процентах от поверхностной.

Из рис. 9, на котором приведены результаты измерений радиоактивности фильтра первой установки видно, что уже во второй слой проходит лишь около 10% радиоактивности; затем количество ее с глубиной постепенно падает и, начиная с глубины 20 см, уже почти не обнаруживается.

На рис. 10 приведен результат таких же измерений для фильтра второй установки. Здесь во второй слой проникает около 25% поверхностной радиоактивности. До глубины в 16 см радиоактивность падает очень медленно, а затем до самого дна фильтра несколько быстрее, причем в последнем слое остается около 3% радиоактивности поверхностного слоя.

Таким образом, распределение радиоактивности по вертикальным слоям в фильтрах первой и второй установок различно: в фильтре второй установки падение ее с глубиной происходит значительно медленнее и в

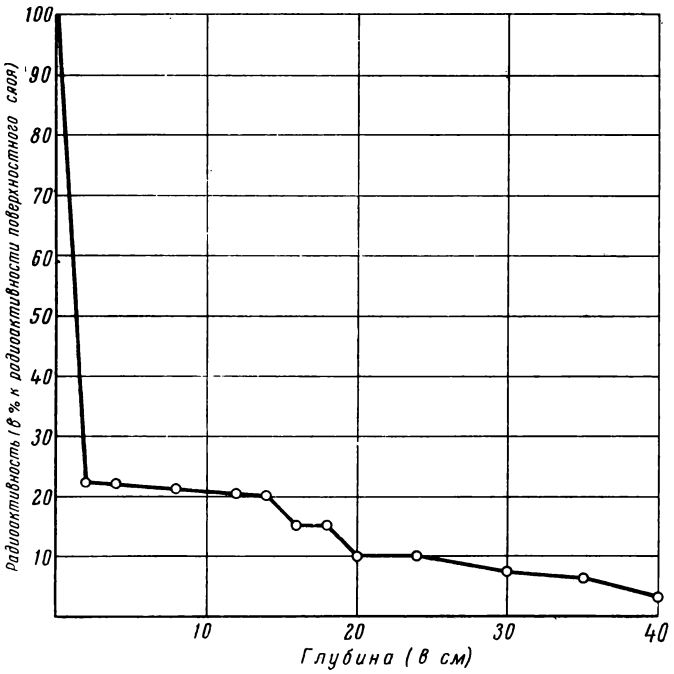


Рис. 10. Распределение радиоактивности по вертикальному разрезу почвенного фильтра второй установки

самом нижнем слое она обнаруживается еще в заметном количестве. Напомним, что во второй установке фильтр работал всегда несколько хуже, чем в первой установке; это подтверждается приведенными выше измерениями распределения радиоактивности по вертикальным слоям. Худшая работа фильтра второй установки и более глубокое проникновение радиоактивности несомненно объясняются тем, что в фильтр поступала активность, прошедшая через пруд, в котором преимущественно сорбировались те же элементы из смеси осколков урана, которые лучше сорбируются и почвенными фильтрами [1]. При этом не следует забывать, что на фильтр второй установки подавалось примерно в 10 раз меньше радиоактивности, чем на фильтр первой, так как более 90% ее поглощалось прудом.

Перейдем теперь к рассмотрению накопления радиоактивности в грунтах.

Грунты прудов всех трех установок состояли из озерного песка с тонкой прослойкой почвы. За первый сезон работы во всех прудах почти не

[1] Об этом свидетельствует, в частности, примерно одинаковое изменение средней жесткости β-излучения после прохождения раствора через почвенные фильтры и через пруды.

образовалось иловых отложений, которые, однако, интенсивно накапливались на дне прудов первой и второй установок за последующие сезоны. Поэтому пробы верхнего слоя брались из прудов первых двух установок в течение трех лет и из прудов третьей установки в течение единственного сезона ее работы; пробы же ила за первый год работы брали лишь из прудов третьей установки, а из прудов первых двух установок ил брали только в течение второго и третьего годов их работы. Вся масса абсолютных измерений не представляет особого интереса, поэтому в табл. 20 приводятся лишь усредненные по сезонам коэффициенты накопления песка и ила. Напомним, что, как было уже упомянуто во введении, коэффициентом накопления мы называем отношение концентраций радиоактивности в данном компоненте и в воде; другими словами, коэффициент накопления показывает, во сколько раз активность данного компонента выше таковой воды.

Таблица 20

Коэффициент накопления радиоактивности грунтами водоемов всех трех установок за все время работы

Грунт	Год	Коэффициент накопления		
		1-й пруд	2-й пруд	Серия из трех прудов (среднее)
Песок	1-й	10	25	25
	2-й	10	25	—
	3-й	20	30	—
Ил	1-й	—	—	75
	2-й	250	350	—
	3-й	2300	4500	—

Из табл. 20 видно, что коэффициенты накопления в песке варьируют от 10 до 30; при этом они ниже в пруду первой установки, вода которого содержала очень мало активности, и лишь немного возрастают на третьем году работы установок. Ил, как уже упоминалось, в течение первого года работы прудов брали лишь из третьей установки и там его коэффициент накопления был около 75. Во второй и третий год работы двух первых установок коэффициенты накопления ила были ниже в пруду первой и выше в пруду второй установки; от второго к третьему году коэффициенты накопления ила возросли с 250 до 2300 в пруду первой и с 350 до 4500 в пруду второй установки. Это резкое возрастание понятно, так как илообразование идет за счет постепенного отмирания высокоактивной биомассы (детрита) и оседания хорошо сорбирующих активность мутей. Таким образом, как и следовало ожидать, особенно высокие коэффициенты накопления обнаружили иловые донные отложения, образующиеся в содержащих радиоактивность прудах.

Для определения накопления радиоактивности в биомассе всех прудов периодически брали пробы различных видов живых организмов, в основном водных растений. Одновременно брали пробы воды. Концентрация радиоактивности в организмах и в воде пересчитывалась на 1 г и затем путем деления активности 1 г вещества организма на радиоактивность 1 куб. см воды определялся коэффициент накопления. Весь материал, полученный таким образом, для каждого вида живых организмов, усреднялся по отдельным прудам и сезонам.

В табл. 21 приведены усредненные по отдельным сезонам коэффициенты накопления радиоактивности всеми организмами, изученными в прудах первой и второй установок за три года их работы. Из этих прудов брали пробы планктона, получавшиеся путем фильтрации воды через частый мельничный газ (лишь в последнем, третьем сезоне работы). Из растений были изучены следующие виды: ряска (смесь видов *Lemna minor* и *Lemna polyrrhiza*), элодея (*Elodea canadensis*), телорез (*Stratiotes aloides*), уруть (*Myriophyllum*), лягушатник или водокрас (*Hydrocharis morsus ranae*), белокрыльник (*Calla palustris*), тростник (*Phragmites communis*), осока рода *Carex* и рогоз (*Typha latifolia*). Уруть и белокрыльник изучались только на третий год, а лягушатник и рогоз — на второй и третий годы работы установок. Из таблицы видно, что почти все виды дали наибольшие коэффициенты накопления за третий, а наименьшие — за второй год работы установок. Особенно высокими коэффициентами накопления отличались планктон, ряска, элодея и лягушатник. У прибрежных укореняющихся растений коэффициенты накопления радиоактивности в корнях были значительно выше, чем в зеленой массе.

Таблица 21

Коэффициенты накопления радиоактивности планктоном и водной прибрежной растительностью прудов первых двух установок за три года работы

Организмы	1-й пруд			2-й пруд		
	1952 г.	1953 г.	1954 г.	1952 г.	1953 г.	1954 г.
Планктон	—	—	1750	—	—	2750
Ряска	850	320	1175	550	325	3400
Лягушатник (водокрас)	—	85	775	—	150	1650
Элодея	600	250	1500	900	300	2500
Уруть	—	—	1110	—	—	6000
Телорез	225	110	1500	750	225	800
Белокрыльник						
зеленая масса	—	—	140	—	—	220
корни	—	—	730	—	—	—
Осока						
зеленая масса	30	25	150	25	25	180
корни	70	50	680	25	25	725
Тростник						
зеленая масса	40	30	200	—	20	200
корни	150	110	700	—	100	1100
Рогоз						
зеленая масса	—	190	900	—	150	2000

В табл. 22 приведены усредненные за весь сезон работы коэффициенты накопления радиоактивности различными организмами, обитавшими в прудах третьей установки. Из растений здесь изучались ряска, элодея, телорез, лягушатник, белокрыльник, тростник и осока; из животных катушка (*Planorbis cerneus*), прудовики (*Lymnea stagnalis*), икра прудовиков, бокоплавы (*Gammarus pulex*) и окунь (*Perca fluviatilis*). Тростник, икра прудовиков, бокоплавы и окуни изучались лишь в первом, а катушка только в третьем пруду. Из растений особенно высокими коэффициентами накопления отличались ряска, элодея и лягушатник, а из животных — прудовик.

Таблица 22

Коэффициенты накопления излучателей некоторыми водными растениями и животными из трех прудов третьей установки

Организмы	1-й пруд	2-й пруд	3-й пруд
Ряска	5500	2450	710
Элодея	3700	2600	1220
Телорез	2200	900	880
Лягушатник (водокрас)			
зеленая масса	1550	2150	770
корни	4100	4250	1000
Белокрыльник			
зеленая масса	390	80	85
корни	1446	350	150
Тростник			
зеленая масса	1250	—	—
корни	2000	—	—
Осока			
зеленая масса	100	15	55
корни	400	100	90
Катушка	—	—	750
Прудовик	2200	850	650
Икра прудовиков	750	—	—
Бокоплав	450	—	—
Окунь			
чешуя	85	—	—
скелет	40	—	—
мышцы	5	—	—
внутренние органы	14	—	—

У укореняющихся растений корни значительно радиоактивнее зеленой массы. Особенно обращает на себя внимание то обстоятельство, что коэффициенты накопления в первом пруду были заметно выше, чем во втором и третьем. Из табл. 21 видно, что в пруду второй установки коэффициенты накопления были выше, чем в пруду первой установки. Более высокие коэффициенты накопления у тех же видов живых организмов в пруду второй установки и особенно в первом пруду третьей установки несомненно объясняются тем, что раствор осколков урана спускался непосредственно в эти пруды, а в остальные попадали уже, пройдя либо через фильтр, либо через пруд.

Таким образом, в полном согласии с результатами ряда лабораторных опытов для большинства живых организмов были получены сравнительно высокие коэффициенты накопления излучателей, значительно превышающие таковые для песка. Особенно высокие коэффициенты накопления были получены для планктона, ряски, погруженных растений и иловых отложений. Сравнительно большие колебания коэффициентов накопления радиоактивности водными организмами в прудах наружных установок вполне понятны, если учесть изменчивость концентрации и состава смеси излучателей в воде. Само собой разумеется, что точное изучение видовых коэффициентов накопления возможно лишь в лабораторных опытах с чистыми растворами отдельных элементов. Средние порядки величин коэффи-

циентов накопления для песка, ила, живых организмов, однако, хорошо согласуются с полученными данными по поглощению активности грунтом и биомассой прудов.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Результаты всех описанных в предыдущих разделах опытов приводят к следующим основным выводам.

Установки, в одной из которых почвенный фильтр находится перед прудом, а в другой после пруда, не различались существенно в смысле эффективности своей работы: вытекавшая из обеих установок вода содержала от 0,5 до 2% исходной радиоактивности. При этом как пруд, так и фильтры дезактивировали воду в более или менее одинаковой степени, очищая ее примерно на 90%. Некоторая разница наблюдалась в зависимости от последовательности расположения фильтра и пруда и сводилась к тому, что несколько лучше всегда работал первый объект: фильтр в первой и пруд во второй установке. Это несомненно объясняется тем, что из смеси раствора осколков урана как фильтры, так и пруды лучше задерживают в основном одни и те же элементы. За три года работы и при проведении осенью второго года специальных опытов с форсированным режимом спуска растворов излучателей пруды этих установок не обнаружили заметных признаков насыщения радиоактивностью.

Как показали определения коэффициентов накопления, особенно большую роль в поглощении радиоактивности прудом играют живые организмы, для которых в зависимости от вида и условий были получены коэффициенты накопления от 100 до нескольких тысяч. Особенно высокие коэффициенты накопления дали постепенно образующиеся из детрита иловые донные отложения.

Ввиду ряда неудобств, связанных с использованием почвенных фильтров, и установленного в опытах на первых двух установках сходства в работе фильтров и прудов была устроена третья установка, состоящая из трех прудов, связанных друг с другом. Опыты, проводившиеся при ежесуточном спуске раствора осколков урана концентрацией 10 мккюри/л в количестве около $^1/_{50}$ общего объема прудов, дали вполне удовлетворительные результаты: в трех прудах поглощалось более 99% исходной радиоактивности.

Таким образом, поступающие в водоемы в ничтожных концентрациях химические элементы весьма быстро концентрируются из раствора различными, преимущественно живыми компонентами водоема. При этом основной биогеохимический механизм сводится к тому, что концентрированные живыми организмами элементы с отмиранием животных и растений и образованием детрита накапливаются в иловых донных отложениях. Описанные в этой работе опыты с наружными установками сравнительно крупного масштаба из технических и отчасти практических соображений проводились с растворами смеси осколков урана. Основной задачей данных опытов было установление возможности почвенно-биологической дезактивации воды и степени этой дезактивации. Не подлежит сомнению, что разные химические элементы концентрируются одним и тем же видом живых организмов в неодинаковой степени, а те или иные группы и виды живых организмов накапливают один и тот же химический элемент в разных количествах. Точному выяснению видово-специфических коэффициентов накопления отдельных элементов, а также установлению различий в процентах общей дезактивации воды от разных элементов при прохождении через серии водоемов посвящены проводящиеся в нашей лаборатории опыты в аквариумах и сериях слабопроточных бачков.

На основании таких опытов можно будет впоследствии, создавая в прудах-отстойниках оптимальные для поглощения определенной смеси

элементов биоценозы, заметно улучшить дезактивационную работу водоемов.

Следует заметить, что вряд ли даже сравнительно высокие концентрации радиоактивности в донных отложениях, не говоря уже о сравнительно ничтожных концентрациях ее в воде, могут в какой-либо мере подавлять развитие пресноводного биоценоза. Проводившиеся нами специальные опыты с пресноводным перифитоном и элодеей показали, что содержание в воде радиоактивности в концентрациях от 10^{-6} до 10^{-4} кюри/л не только не подавляет, но даже заметно стимулирует рост и развитие этих организмов (Тимофеев-Ресовский, Порядкова, Сокурова и Тимофеева-Ресовская, 1957). То же самое в еще большей мере касается почвенной и водной микрофлоры.

В заключение необходимо кратко указать на некоторые основные недостатки и достоинства биологической дезактивации сточных вод при разработке и использовании соответствующих установок для практических целей. Основным и, пожалуй, единственным недостатком является то, что установка из нескольких прудов занимает относительно большую площадь, и чем «грязнее» сточные воды, чем выше их радиоактивность и больше объем суточного стока, тем бóльшую площадь должны занимать пруды. Конечно, должны быть приняты все меры (защитные ветровые насаждения, аккуратное оформление берегов; минимальное участие в биоценозе личинок насекомых и птиц) для предотвращения ветрового и биологического разноса активности из донных и береговых отложений. Основными достоинствами подобных средств дезактивации являются простота, дешевизна и безаварийность; эксплуатация их не требует почти никаких затрат труда и средств, если не считать периодического ухода за газонами и насаждениями. Особенно существенно то, что водоемы наряду с дезактивацией и очисткой воды исполняют функцию кладбища радиоактивности, захороняя активность в своих донных отложениях. Последнее обстоятельство не должно пугать, так как слой воды глубиной около 1 м задерживает практически все γ-лучи, испускаемые концентрированной радиоактивностью грунта. Измерения, проводившиеся нами над поверхностью воды и по берегам прудов, показали, что дозы излучений вокруг этих установок не превышают толерантных.

Очень интересные результаты дали специальные дозиметрические расчеты, проведенные Н. В. Горбатюком. Они сводятся в основном к тому, что дозы излучений вокруг водоемов, диаметр которых превышает несколько метров, а глубина составляет около 1 м, совершенно не зависят от их абсолютных размеров и активности грунтов, а лишь от концентрации радиоактивных элементов в воде. Это на первый взгляд могущее показаться парадоксальным обстоятельство объясняется поглощением излучений в водоеме [1].

Для практических целей следует, по-видимому, предусматривать две серии прудов-отстойников, объемом каждая не менее 50 суточных сбросов воды; обе серии должны работать попеременно (по два года). В результате в «отдыхающей» серии наиболее радиоактивные верхние слои донных отложений за время перерыва в работе (особенно при спуске нерадиоактивных мутей в воду прудов) будут покрываться менее радиоактивными осадками. Конечно, применение биологического метода дезактивации сточных вод требует специальных инженерно-технических и гидрологических разработок.

---

[1] Н. В. Горбатюк, А. Н. Тимофеев. 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. Статья в настоящем сборнике.

Наконец, из установленных нами весьма высоких коэффициентов накопления радиоактивности некоторыми видами пресноводных организмов и иловыми донными отложениями следует, что при контрольных измерениях в подозреваемых на радиоактивное загрязнение водоемах необходимо обращать особое внимание на живые организмы и илы близ предполагаемых мест загрязнения. В пробах из этих компонентов концентрация радиоактивности может на два — четыре порядка величин превышать таковую в воде или показывать некоторое содержание радиоактивности при отсутствии таковой в воде.

ВЫВОДЫ

1. Описываются опыты по дезактивации воды, содержащей раствор осколков урана, при помощи трех наружных установок.

2. Первая установка состояла из почвенного фильтра и расположенного за ним пруда-отстойника, емкостью около 30 куб. м; вторая установка состояла из такого же пруда и расположенного за ним почвенного фильтра. Фильтры были емкостью около 0,1 куб. м. В течение трех летних сезонов через первую установку пропускалось ежедневно по 250, а через вторую по 300 л раствора осколков урана концентрацией 25 мккюри/л в течение двух первых и 10 мккюри/л в течение третьего сезона. Периодически измерялась активность воды, вытекающей из фильтров, из прудов и воды из середины каждого пруда: два раза в месяц брались пробы грунта и водных растений для измерения в них радиоактивности.

3. Опыты показали, что в обеих установках пруды и фильтры поглощали около 99% поступающей в них радиоактивности. Из обеих установок вытекало, таким образом, около 1% впущенной в них активности.

4. Фильтр второй и пруд первой установки работали несколько хуже фильтра первой и пруда второй установки. Промеры средней жесткости β-излучения исходного раствора, растворов, прошедших через фильтр или пруд, показали, что прохождение через фильтр или пруд примерно в одинаковой степени понижает жесткость излучения. Из этих наблюдений следует, что прудами и почвенными фильтрами преимущественно задерживаются одни и те же элементы из смеси излучателей, чем и объясняется несколько худшая работа второго очистного сооружения (пруда или фильтра) в каждой установке.

5. За время работы в течение трех сезонов и проведения специального опыта при форсированном режиме (подача 1000 л раствора в сутки) не было замечено наступающего насыщения прудов.

6. Основываясь на результатах опытов с двумя первыми установками, решено было в третьей установке обойтись без почвенного фильтра, заменив его прудами.

7. Третья установка состояла из трех последовательно соединенных стоком прудов, общей емкостью около 50 куб. м. В первый пруд ежесуточно подавалось по 1000 л раствора осколков урана концентрацией 10 мккюри/л. Периодически брались пробы грунтов и живых организмов для определения в них радиоактивности.

Из третьей установки выходило менее 1% поступившей в нее радиоактивности, причем первый пруд работал лучше последующих.

8. Измерения радиоактивности в грунтах и живых организмах, как и следовало ожидать на основании прежних опытов, позволили обнаружить особенно высокие коэффициенты накопления излучателей в планктоне, ряске, погруженных растениях и донных иловых отложениях.

ЛИТЕРАТУРА

Агафонов Б. М. Опыты по дезактивации воды в сериях водоемов-бачков. Всесоюзная конференция по медицинской радиологии. М., Медгиз, 1956.

Агафонов Б. М., Долгих Т. И. и др. Распределение рассеянных элементов по компонентам водоемов. 3. Опыты по распределению стронция, рутения, цезия, церия и раствора осколков урана в сериях бачков (см. настоящий сборник).

Броуновский П. К. Концентрация радия организмами. Тр. Биогеохимической лаборатории АН СССР, т. 2. М., 1932.

Броуновский П. К. и Кунашева К. Г. Некоторые данные относительно содержания радия в растениях и в водах. Тр. Биогеохимической лаборатории АН СССР, т. 3. М., 1935.

Вернадский В. И. Живое вещество в химии моря. Научн.-хим. техн. изд-во, 1932.

Вернадский В. И. Изотопы и живое вещество. ДАН СССР, серия А, 1926.

Вернадский В. И. О рассеянии химических элементов. Общий отчет лаборатории АН СССР. Л., 1927.

Вернадский В. И. О классификации и химическом составе природных вод. «Природа», 1929, № 9.

Вернадский В. И. О концентрации радия живыми организмами. ДАН СССР, серия А., 1929, 2, 33—34.

Вернадский В. И. Биосфера, Л., Научн.-хим. техн. изд-во, 1926.

Вернадский В. И. Очерки геохимии. М., Гос. научное горно-геол. изд-во, 1934.

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

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

Виноградов А. П. О химическом составе пресноводного планктона. Тр. 2-го Всес. гидробиол. съезда. Л., 1929.

Виноградов А. П. Химический элементарный состав организмов моря, ч. 1—3. Тр. Биогеохимической лаборатории АН СССР, 1935—1944, т. 3, 4 и 6.

Виноградов А. П. Химический состав морского планктона. Тр. Океанографического ин-та, т. VII. М., Изд-во АН СССР, 1938.

Виноградов А. П. Химический состав планктона. Тр. Биогеохимической лаборатории АН СССР, М., 1930.

Виноградов А. П. Геохимия рассеянных элементов в морской воде. «Успехи химии», т. 13, вып. 1, 1944.

Виноградов А. П. Геохимия редких и рассеянных химических элементов в почвах. М., Изд-во АН СССР, 1950.

Зенкевич Л. А. Фауна и биологическая продуктивность моря, т. 1 и 2. М., Изд-во «Сов. наука», 1947—1951.

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

Тимофеев-Ресовский Н. В., Порядкова Н. А., Сокурова Е. Н. и Тимофеева-Ресовская Е. А. Влияние излучателей на биомассу и структуру наземных почвенных и пресноводных биоценозов. Тр. Ин-та биол. УФАН СССР, вып. 9. Свердловск, 1957.

Тимофеев-Ресовский Н. В. Распределение рассеянных элементов по компонентам водоемов. Некоторые общие соображения (см. настоящий сборник).

Coffin C. C., Hayes F. R., Yordey Z. N. and Whiteway S. G. Exchange of materials in a lake as studied by the addition of radioactive phosphorus. Can. J. of Res., vol. 27, 1944.

Hayes F. R. On the kinetics of phosphorus exchange in lakes. J. Ecol., 40(I), 1952.

McCarter J. A. Movement of material in the hypolimion of a lake as studied by the addition of radioactive phosphorus. Can. J. of Zoology, vol. 30, 152.

Ruchhoft C. C. The possibilities of disposal of radioactive Wastes by biological treatment methods. Seuage works J. V., 21, 1949.

ПРИЛОЖЕНИЕ 1

Баланс радиоактивности первой установки по неделям

Число, месяц (1953 г.)	Количество радиоактивности (в имп/мин)							
	поступило в фильтр	вытекло из фильтра	поглотилось фильтром	поглотилось прудом	поглотилось прудом с начала опыта	поглотилось грунтом и биомассой	находилось в воде пруда	вытекло из пруда
19—21/V	$3{,}9\cdot10^{9}$	$1{,}07\cdot10^{8}$	$3{,}79\cdot10^{9}$	$0{,}73\cdot10^{8}$	$70{,}73\cdot10^{8}$	$28{,}73\cdot10^{8}$	$4{,}2\cdot10^{9}$	$0{,}34\cdot10^{8}$
22—29/V	$10{,}57\cdot10^{9}$	$2{,}03\cdot10^{8}$	$10{,}37\cdot10^{9}$	$0{,}44\cdot10^{8}$	$71{,}17\cdot10^{8}$	$23{,}77\cdot10^{8}$	$4{,}74\cdot10^{9}$	$1{,}59\cdot10^{8}$
30/V — 6/VI	$11{,}3\cdot10^{9}$	$2{,}87\cdot10^{8}$	$11{,}02\cdot10^{9}$	$2{,}2\cdot10^{8}$	$73{,}37\cdot10^{8}$	$42{,}57\cdot10^{8}$	$3{,}08\cdot10^{9}$	$0{,}67\cdot10^{8}$
9—16/VI	$10{,}4\cdot10^{9}$	$2{,}12\cdot10^{8}$	$11{,}19\cdot10^{9}$	$0{,}35\cdot10^{8}$	$73{,}69\cdot10^{8}$	$33{,}19\cdot10^{8}$	$4{,}05\cdot10^{9}$	$1{,}77\cdot10^{8}$
17—29/VI	$9{,}95\cdot10^{9}$	$3{,}72\cdot10^{8}$	$9{,}58\cdot10^{9}$	$3{,}13\cdot10^{8}$	$76{,}82\cdot10^{8}$	$48{,}42\cdot10^{8}$	$2{,}84\cdot10^{9}$	$0{,}59\cdot10^{8}$
30/VI — 7/VII	$9{,}4\cdot10^{9}$	$3{,}73\cdot10^{8}$	$9{,}03\cdot10^{9}$	$2{,}64\cdot10^{8}$	$79{,}46\cdot10^{8}$	$52{,}16\cdot10^{8}$	$2{,}73\cdot10^{9}$	$1{,}09\cdot10^{8}$
8—15/VII	$8{,}4\cdot10^{9}$	$3{,}53\cdot10^{8}$	$8{,}03\cdot10^{9}$	$2{,}96\cdot10^{8}$	$82{,}45\cdot10^{8}$	$46{,}92\cdot00^{8}$	$3{,}05\cdot10^{9}$	$0{,}57\cdot10^{8}$
16—23/VII	$7{,}95\cdot10^{9}$	$3{,}78\cdot10^{8}$	$7{,}57\cdot10^{9}$	$3{,}17\cdot10^{8}$	$85{,}19\cdot10^{8}$	$59{,}19\cdot10^{8}$	$2{,}64\cdot10^{9}$	$0{,}61\cdot10^{8}$
24—31/VII	$8{,}95\cdot10^{9}$	$3{,}36\cdot10^{8}$	$8{,}61\cdot10^{9}$	$2{,}73\cdot10^{8}$	$88{,}32\cdot10^{8}$	$58{,}62\cdot10^{8}$	$2{,}97\cdot10^{9}$	$0{,}62\cdot10^{8}$
1—8/VIII	$7{,}8\cdot10^{9}$	$3{,}08\cdot10^{8}$	$7{,}49\cdot10^{9}$	$2{,}44\cdot10^{8}$	$90{,}77\cdot10^{8}$	$64{,}87\cdot10^{8}$	$2{,}59\cdot10^{9}$	$0{,}64\cdot10^{8}$
11—19/VIII	$8{,}55\cdot10^{9}$	$3{,}22\cdot10^{8}$	$8{,}83\cdot10^{9}$	$2{,}66\cdot10^{8}$	$93{,}21\cdot10^{8}$	$63{,}21\cdot10^{8}$	$3{,}0\cdot10^{9}$	$0{,}56\cdot10^{8}$
20—27/VIII	$9{,}45\cdot10^{9}$	$3{,}9\cdot10^{8}$	$9{,}06\cdot10^{9}$	$3{,}47\cdot10^{8}$	$96{,}68\cdot10^{8}$	$62{,}88\cdot10^{8}$	$3{,}38\cdot10^{9}$	$0{,}43\cdot10^{8}$
28/VIII — 2/IX	$4{,}65\cdot10^{9}$	$3{,}03\cdot10^{8}$	$4{,}35\cdot10^{9}$	$2{,}58\cdot10^{8}$	$99{,}26\cdot10^{8}$	$66{,}76\cdot10^{8}$	$3{,}25\cdot10^{8}$	$0{,}45\cdot10^{8}$
3—5/IX	$2{,}65\cdot10^{9}$	$1{,}82\cdot10^{8}$	$2{,}47\cdot10^{9}$	$1{,}3\cdot10^{8}$	$100{,}56\cdot10^{8}$	$73{,}61\cdot10^{8}$	$2{,}69\cdot10^{9}$	$0{,}52\cdot10^{8}$
Всего	$113{,}92\cdot10^{9}$	$4{,}12\cdot10^{9}$	$109{,}77\cdot10^{9}$	$3{,}08\cdot10^{9}$	—	—	—	$1{,}04\cdot10^{9}$

ПРИЛОЖЕНИЕ 2

Баланс радиоактивности второй установки по неделям

Число, месяц (1953 г.)	Количество радиоактивности (в имп/мин)							
	поступило в пруд	поглотилось прудом	поглотилось прудом с начала опыта	поглотилось грунтом и биомассой	поглотилось водой	поступило на фильтр	поглотилось фильтром	вышло из фильтра
19—21/V	$4{,}46 \cdot 10^9$	$4{,}21 \cdot 10^9$	$32{,}21 \cdot 10^9$	$11{,}21 \cdot 10^9$	$21{,}0 \cdot 10^9$	$2{,}46 \cdot 10^8$	$2{,}15 \cdot 10^8$	$0{,}31 \cdot 10^8$
22—29/V	$13{,}78 \cdot 10^9$	$12{,}92 \cdot 10^9$	$45{,}13 \cdot 10^9$	$24{,}13 \cdot 10^9$	$21{,}0 \cdot 10^9$	$8{,}55 \cdot 10^8$	$5{,}59 \cdot 10^8$	$2{,}96 \cdot 10^8$
30/V — 6/VI	$12{,}18 \cdot 10^9$	$11{,}41 \cdot 10^9$	$56{,}54 \cdot 10^9$	$34{,}34 \cdot 10^9$	$22{,}2 \cdot 10^9$	$7{,}7 \cdot 10^8$	$5{,}3 \cdot 10^8$	$2{,}4 \cdot 10^8$
9—16/VI	$11{,}07 \cdot 10^9$	$10{,}14 \cdot 10^9$	$66{,}68 \cdot 10^9$	$46{,}78 \cdot 10^9$	$19{,}9 \cdot 10^9$	$9{,}35 \cdot 10^8$	$6{,}29 \cdot 10^8$	$3{,}06 \cdot 10^8$
17—29/VI	$10{,}33 \cdot 10^9$	$9{,}91 \cdot 10^9$	$76{,}59 \cdot 10^9$	$62{,}59 \cdot 10^9$	$14{,}3 \cdot 10^9$	$4{,}25 \cdot 10^8$	$2{,}99 \cdot 10^8$	$1{,}26 \cdot 10^8$
30/VI — 7/VII	$10{,}54 \cdot 10^9$	$9{,}91 \cdot 10^9$	$86{,}5 \cdot 10^9$	$70{,}8 \cdot 10^9$	$15{,}7 \cdot 10^9$	$6{,}35 \cdot 10^8$	$4{,}73 \cdot 10^8$	$1{,}62 \cdot 10^8$
8—15/VII	$10{,}79 \cdot 10^9$	$10{,}42 \cdot 10^9$	$96{,}93 \cdot 10^9$	$82{,}92 \cdot 10^9$	$14{,}0 \cdot 10^9$	$3{,}75 \cdot 10^8$	$2{,}62 \cdot 10^8$	$1{,}13 \cdot 10^8$
16—23/VII	$9{,}97 \cdot 10^9$	$9{,}48 \cdot 10^9$	$106{,}4 \cdot 10^9$	$93{,}5 \cdot 10^9$	$12{,}9 \cdot 10^9$	$4{,}91 \cdot 10^8$	$5{,}53 \cdot 10^8$	$1{,}38 \cdot 10^8$
24—31/VII	$10{,}16 \cdot 10^9$	$9{,}48 \cdot 10^9$	$115{,}88 \cdot 10^9$	$104{,}28 \cdot 10^9$	$11{,}6 \cdot 10^9$	$6{,}8 \cdot 10^8$	$4{,}08 \cdot 10^8$	$2{,}78 \cdot 10^8$
1—8/VIII	$9{,}93 \cdot 10^9$	$9{,}65 \cdot 10^9$	$125{,}53 \cdot 10^9$	$105{,}23 \cdot 10^9$	$10{,}3 \cdot 10^9$	$2{,}8 \cdot 10^8$	$1{,}45 \cdot 10^8$	$1{,}35 \cdot 10^8$
11—19/VIII	$9{,}97 \cdot 10^9$	$9{,}62 \cdot 10^9$	$135{,}15 \cdot 10^9$	$123{,}85 \cdot 10^9$	$11{,}3 \cdot 10^9$	$3{,}5 \cdot 10^8$	$1{,}85 \cdot 10^8$	$1{,}65 \cdot 10^8$
20—22/VIII	$4{,}77 \cdot 10^9$	$4{,}59 \cdot 10^9$	$139{,}74 \cdot 10^9$	$129{,}04 \cdot 10^9$	$10{,}7 \cdot 10^9$	$1{,}76 \cdot 10^8$	$0{,}70 \cdot 10^8$	$1{,}06 \cdot 10^8$
Всего	$117{,}95 \cdot 10^9$	$111{,}74 \cdot 10^9$	—	—	—	$62{,}18 \cdot 10^8$	$41{,}22 \cdot 10^8$	$20{,}96 \cdot 10^8$

АКАДЕМИЯ НАУК СССР
УРАЛЬСКИЙ ФИЛИАЛ
Вып. 12 ТРУДЫ ИНСТИТУТА БИОЛОГИИ 1960

Н. В. ГОРБАТЮК, А. Н. ТИМОФЕЕВ

РАСПРЕДЕЛЕНИЕ РАССЕЯННЫХ ЭЛЕМЕНТОВ ПО КОМПОНЕНТАМ ВОДОЕМОВ

III. СТАБИЛИЗАЦИЯ РАДИОАКТИВНОСТИ СВЕЖЕГО РАСТВОРА ОСКОЛКОВ УРАНА ПРИ РАВНОМЕРНОМ ЕГО ПОСТУПЛЕНИИ В ВОДОЕМ И ДОЗЫ ИЗЛУЧЕНИЯ ВНУТРИ И ВНЕ ВОДОЕМА

ВВЕДЕНИЕ

Лабораторные опыты показали высокую сорбционную способность компонентов искусственного водоема по отношению к поступающей в него радиоактивности (Тимофеева-Ресовская и Тимофеев-Ресовский, 1952; Тимофеева-Ресовская и др., 1953; Тимофеев-Ресовский и Тимофеева-Ресовская, 1954). По этой причине представляет интерес проблема использования различного типа водоемов в качестве хранилищ промышленных радиоактивных отходов, в качестве прудов-отстойников для сбрасывания радиоактивных сточных вод или для окончательной биологической очистки после прохождения через специальные очистные сооружения.

При постоянном поступлении радиоактивности в водоем активность в нем, в зависимости от величины суточного поступления, постепенно возрастает до известного предела. В результате самый водоем может стать источником излучения, причем величина этого излучения зависит от габаритов водоема и удельной радиоактивности воды и грунта в нем. В целях охраны труда и для установления санитарных норм весьма желательно знать, хотя бы приближенно, уровень радиоактивности и дозы излучения внутри и вне такого водоема.

В настоящей работе приближенно определяются предел накопления в хранилище радиоактивности при постоянном равномерном поступлении ее в водоем и дозы излучения, возникающие внутри и вне такого водоема.

Стабилизация радиоактивности неразделенного раствора осколков урана при длительном равномерном поступлении в хранилище

В первом приближении можно принять, что при неизменном объеме производства с одним и тем же радиоактивным сырьем ежедневно поступающие в хранилище порции радиоактивных отходов будут примерно одинаковыми. С течением времени количество радиоактивности в таком хранилище будет возрастать. Однако, возрастание это будет происходить до определенного предела, так как при этом одновременно возрастет и об-

щее число радиоактивных распадов. В результате этих конкурирующих процессов наступит такой момент, когда количество поступающей в хранилище радиоактивности будет равно количеству распавшейся за это же время т. е. наступит динамическое равновесие. Произведем расчет уровня и времени стабилизации радиоактивности неразделенных растворов осколков урана возрастом 30 дней и 180 дней.

Примерный состав и содержание в них различных радиоактивных изотопов показаны в табл. 1. Поскольку приводимые цифры носят сугубо ориентировочный характер, результаты расчетов будут приближенными.

Таблица 1

Процентное содержание радиоактивности отдельных компонентов в неразделенном растворе осколков урана возрастом в 30 и 180 дней

Изотоп	Возраст раствора (в днях)		Изотоп	Возраст раствора (в днях)	
	30	180		30	180
Стронций-89	10,05	7,98	Теллур-132	0,0537	—
Стронций-90	0,13	0,632	Йод-131	1,97	—
Иттрий-90	0,13	0,632	Цезий-136	0,0162	—
Иттрий-91	12,6	11,6	Цезий-137	0,103	0,575
Цирконий-95	12,7	14,5	Барий-140	9,65	—
Ниобий-95	9,15	25,9	Лантан-140	11,1	—
Рутений-103	8,82	3,98	Церий-141	1,44	1,99
Рутений-106	0,261	1,11	Церий-144	3,56	13,8
Родий-106	0,261	1,11	Празеодим-143	10,31	0,274
Серебро-111	0,011	—	Празеодим-144	3,56	13,8
Олово-121—123	0,0015	0,0038	Неодим-147	3,32	—
Сурьма-125	0,00465	0,0236	Прометий-147	0,35	1,95
Сурьма-127	0,01	—	Европий-155	0,0086	0,042
Теллур-127	0,058	0,082	Технеций-99	8×10^{-7}	5×10^{-6}
Теллур-129	0,40	0,089	Кадмий-155	0,002	0,001

Радиоактивность каждого компонента одной порции такого раствора изменяется с течением времени по закону радиоактивного распада:

$$A_i = A_{0,i}\, e^{-0{,}693\,\frac{t}{T_i}} + A_i', \qquad (1)$$

где $A_{o,i}$ — начальная радиоактивность i-го компонента этого раствора; A_i — радиоактивность i-го компонента через время t; A_i' — увеличение радиоактивности данного компонента за счет распада материнского вещества; T_i — период полураспада i-го компонента.

Радиоактивность одной поступающей в хранилище порции неразделенного раствора осколков урана через время t после поступления будет равна:

$$A = \sum_{i=1}^{n} A_i = \sum_{i=1}^{n} A_{0,i} e^{-0{,}693\,\frac{t}{T_i}} + \sum_{i=1}^{n} A_i', \qquad (2)$$

где n — число компнентов радиоактивности раствора (Тимофеева-Ресовская и др., 1953).

На рис. 1 показаны кривые относительного изменения радиоактивности неразделенных растворов осколков урана с течением времени (*1* — раствор осколков урана в возрасте 30 дней, *2* — раствор осколков в возрасте 180 дней).

Радиоактивность i-го компонента, накапливающаяся в хранилище за t дней вследствие ежедневного поступления, будет равна:

$$B_j = \sum_0^t A_i. \tag{3}$$

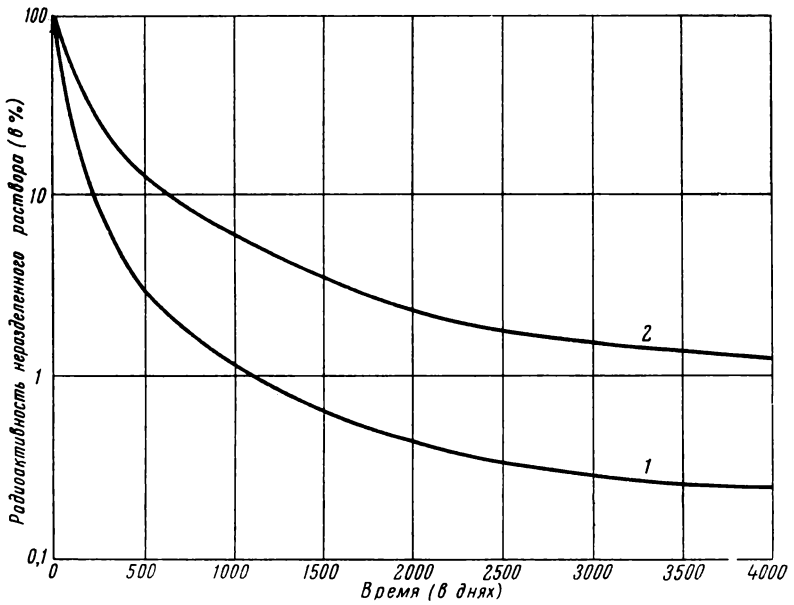


Рис. 1. Изменение во времени радиоактивности неразделенных растворов осколков урана в возрасте 30 (*1*) и 180 (*2*) дней

Тогда для радиоактивности неразделенного раствора осколков, накапливающейся за t дней поступления, получим выражение:

$$B = \sum_1^n B_j = \sum_1^n \sum_0^t A_i. \tag{4}$$

Для непрерывного поступления в хранилище радиоактивности неразделенного раствора осколков урана, выражение (4) будет иметь следующий вид:

$$B = \sum_1^n \int_0^t A_i \, dt, \tag{5}$$

где A_i — поступление i-го компонента в единицу времени.

Совершенно очевидно, что относительный уровень и время стабилизации радиоактивности неразделенного раствора осколков в такого рода хранилище будут определяться относительным содержанием в растворе долгоживущих изотопов, т. е. в данном случае изотопов стронция-90 и цезия-137.

На рис. 2 показаны кривые накопления в хранилище радиоактивности при ежедневном поступлении в него в одинаковых количествах неразделенных растворов осколков урана в возрасте 30 и 180 дней. На этом рисунке, изображенном в логарифмической системе координат, показано от-

ношение накопленной в хранилище за данное время радиоактивности (B) к однодневному поступлению (B_0). Как видно из рисунка, стабилизация радиоактивности неразделенного раствора осколков наступает через 300 лет на уровне 150-кратного дневного поступления раствора возрастом в 30 дней и 510-кратного дневного поступления раствора, возрастом 180 дней.

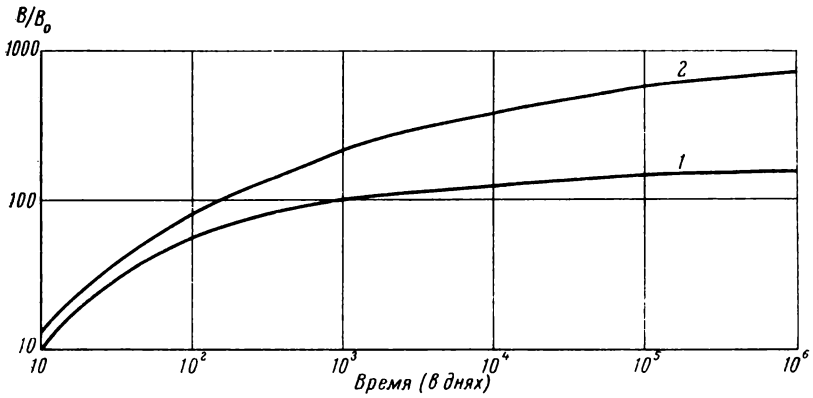


Рис. 2. Нарастание в хранилище радиоактивности неразделенных растворов осколков урана в возрасте 30 (*1*) и 180(*2*) дней при равномерном ежедневном поступлении

Для более старых растворов этот уровень будет тем выше, чем выше содержание в них стронция-90 и цезия-137.

Дозы излучения, возникающие вне водоема, при равномерном распределении в нем радиоактивности неразделенного раствора осколков

Методика расчета

Рассмотрим водоем цилиндрической формы, глубина которого (H) и радиус основания (a) с равномерным распределением радиоактивности в нем.

Для определения мощности дозы γ-излучения такого водоема в некоторой точке M, расположенной на высоте h_1 от его поверхности и на расстоянии b от оси цилиндрического объема, разделим весь объем на цилиндрические диски толщиной dz и определим мощность излучения от каждого из этих дисков. Мощность излучения от всего радиоактивного объема будет равна сумме мощностей от всех дисков.

Выделим на диске, расположенном на глубине h_2, от поверхности, круговой поясок шириной dr и рассмотрим элемент объема этого диска, равный $dz\,ds$, где $ds = rd\theta dr$. Мощность дозы γ-излучения в точке M от этого элемента объема будет равна:

$$\Delta_i = \frac{K \cdot \rho \cdot r \cdot d\theta \cdot dr \cdot dz \cdot e^{-(\mu_1 D_1 + \mu_2 D_2)}}{D^2}, \qquad (6)$$

где D — расстояние элемента объема от точки M; D_1 — величина этого расстояния в воздухе; D_2 — величина этого расстояния в воде; ρ — удельная активность воды; r — радиус кругового пояска на диске; K — γ-постоянная данного излучателя; μ_1 — линейный коэффициент ослабления излучения в воздухе; μ_2 — линейный коэффициент ослабления излучения в воде.

Расстояние D элемента объема от точки M будет равно:

$$D = \sqrt{(h_1 + h_2)^2 + b^2 + r^2 - 2br\cos\theta}. \tag{7}$$

Мощность дозы радиоактивного цилиндрического диска будет равна (Янке, Емде, 1948):

$$\Delta = K\cdot\rho\cdot dz\int_0^a\int_0^{2\pi}\frac{r\cdot dr\cdot d\theta\, e^{-(\mu_1 D_1+\mu_2 D_2)}}{(h_1+h_2)^2+b^2+r^2-2br\cos\theta}. \tag{8}$$

Для частного случая, когда $b = 0$, т. е. когда точка M находится на оси цилиндра:

$$D_1 = \frac{h_1}{h_1+h_2}\sqrt{(h_1+h_2)^2+r^2} \text{ и } D_2 = \frac{h_1}{h_1+h_2}\sqrt{(h_1+h_2)^2+r^2},$$

а уравнение (8) принимает следующий вид:

$$\begin{aligned}\Delta &= K\cdot\rho\cdot dz\int_0^a\int_0^{2\pi}\frac{r\cdot dr\cdot d\theta\, e^{-\left(\frac{\mu_1 h_1+\mu_2 h_2}{h_1+h_2}\right)\sqrt{(h_1+h_2)^2+r^2}}}{(h_1+h_2)^2+r^2}\cdot\\ &= 2\pi\cdot\rho\cdot K\cdot dz\int_0^a\frac{r\cdot dr\, e^{-\left(\frac{\mu_1 h_1+\mu_2 h_2}{h_1+h_2}\right)\sqrt{(h_1+h_2)^2+r^2}}}{(h_1+h_2)^2+r^2}.\end{aligned} \tag{9}$$

Путем соответствующей подстановки, выражение (9) можно привести к следующему виду:

$$\Delta = -2\pi\cdot\rho\cdot K\cdot dz\,\{E_i(-x_1) - E_i(-x_2)\}, \tag{10}$$

где $x_1 = \mu_1 h_1 + \mu_2 h_2$, $x_2 = \frac{\mu_1 h_1+\mu_2 h_2}{h_1+h_2}\sqrt{(h_1+h_2)^2+r^2}$,

а

$$E_i(-x) = \int_x^\infty \frac{e^{-x}}{x}\,dx$$

хорошо известный интеграл, для которого имеются таблицы.

При $a\to\infty$, т. е. для круглого водоема, бесконечно большого радиуса, второй член уравнения (10) стремится к нулю и мощность дозы γ-излучения на высоте h_1, над центром поверхности такого водоема будет равна:

$$N = 2\pi\cdot K\cdot\rho\int_{h_1}^{h_1+h_2} E_i(-x_1)\,dr. \tag{11}$$

Значения γ-постоянных K для различных γ-излучателей, содержащихся в неразделенном растворе осколков, и значения эффективных линейных коэффициентов ослабления в воде и воздухе приведены в табл. 2.

В качестве примера на рис. 3 показано изменение величины

$$\int_{h_1}^{h_1+h_2}\{-E_i(-x_1) + E_i(x_2)\}\,dr,$$

вычисленной методом приближенного интегрирования, в зависимости от толщины слоя воды в радиоактивном водоеме бесконечного радиуса и радиуса в 10 см для $h_1\to 0$ и для энергии γ-квантов в 0,76 *MeV*. Как видно из рисунка, приближенное значение этого интеграла с увеличением толщины слоя воды стремится к пределу при сравнительно небольшой глубине (около 0,5 м). На рис. 4 показаны кривые изменения этой же вели-

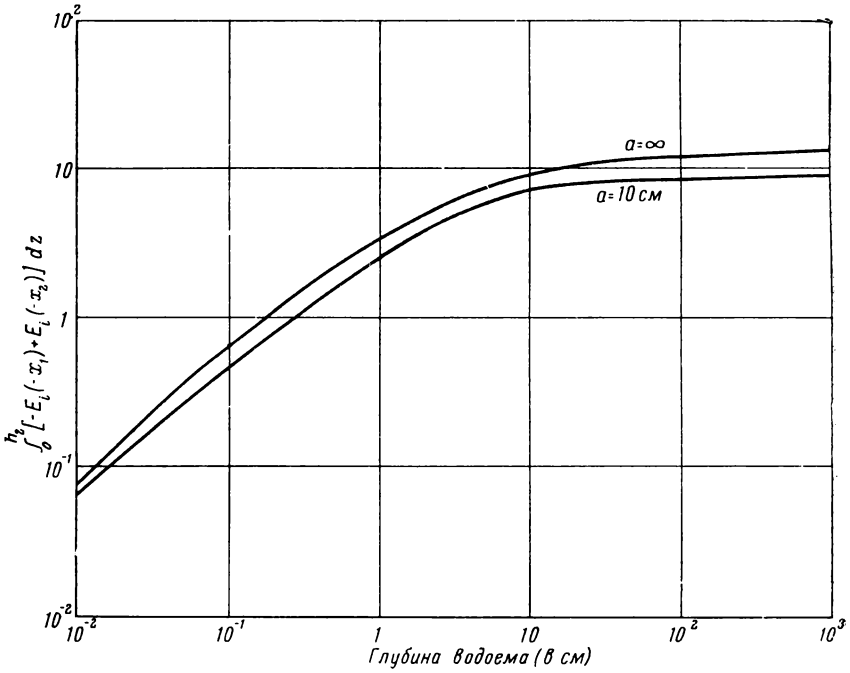


Рис. 3. Зависимость величин $\int_0^{h_2}[-E_i(-x_1)+E_i(-x_2)]\,dz$ от глубины радиоактивного водоема для $E_\gamma = 0{,}76$ *Мэв*

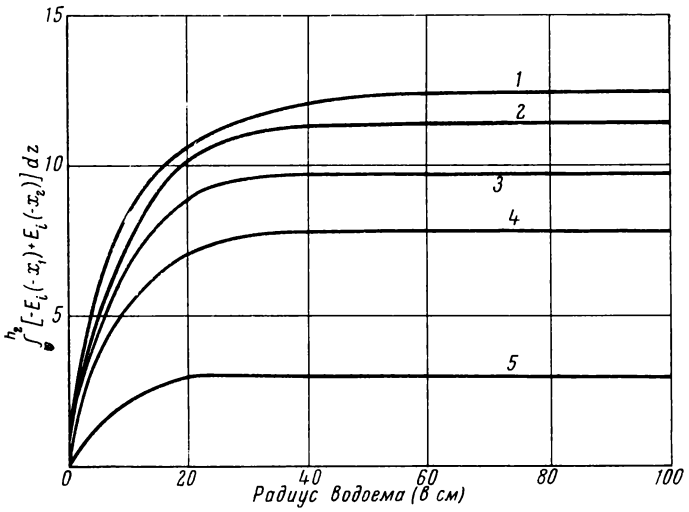


Рис. 4. Зависимость величины $\int_0^{h_2}[-E_i(-x_i)+E_i(-x_2)]\,dz$ от радиуса водоема для E_γ=0,76 *Мэв*

1 — $h_2 > 100$ *см*; 2 — $h_2 = 20$ *см*; 3 — $h_2 = 10$ *см*; 4 — $h_2 = 5$ *см*; 5 — $h_2 = 1$ *см*

чины в зависимости от радиуса цилиндрических водоемов различных глубин, а на рис. 5 — в зависимости от высоты точки над поверхностью водоема при $a = \infty$.

Рис. 4 показывает, что мощность дозы γ-излучения над поверхностью водоема стремится к пределу при радиусе водоема около 0,5 м, т. е. зависимость мощности дозы γ-излучения от радиуса радиоактивного водоема такая же, как и от его глубины. Из рис. 5 видно, что изменение мощности дозы γ-излучения в воздухе в пределах расстояний до 1 м небольшое и находится в области прямолинейного участка кривой.

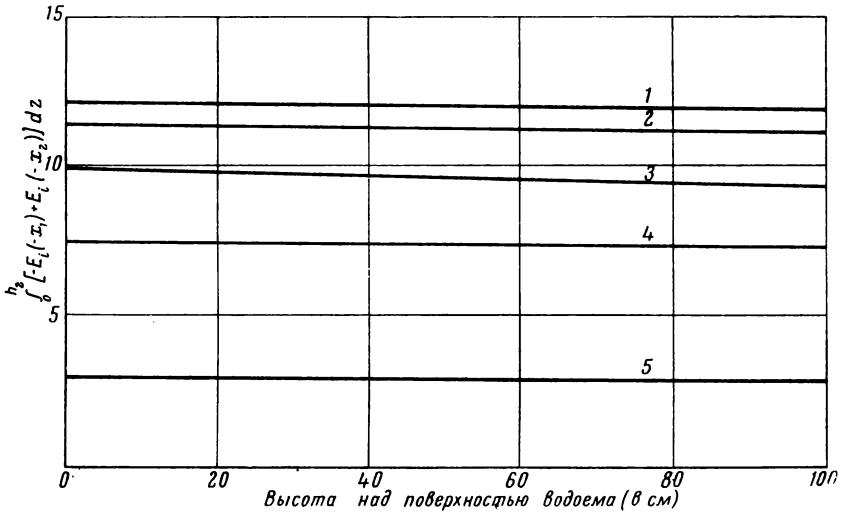


Рис. 5. Зависимость величины $\int_0^{h_2} [-E_i(-x_1) + E_i(-x_2)]\, dz$ при $a = \infty$ от высоты над поверхностью водоема для $E_\gamma = 0{,}76$ *Мэв*

1 — $h_2 > 100$ *см*; *2* — $h_2 = 20$ *см*; *3* — $h_2 = 10$ *см*; *4* — $h_2 = 5$ *см*; *5* — $h_2 = 1$ *см*

В качестве примера определим по рис. 4 удельную радиоактивность γ-излучателя с энергией излучения 0,76 *MeV* (что приблизительно соответствует γ-излучению ниобия-95), распределенного равномерно в водоеме с линейными размерами больше 1 м, и вызывающего над его поверхностью предельно допустимую дозу γ-излучения (0,05 *r* за 8 час.). По уравнению (10), с учетом рис. 4, она будет равна:

$$\rho = \frac{0{,}05}{8 \cdot 2\pi \cdot K \cdot 12{,}53} = \frac{0{,}05 \text{ мкюри/см}^3}{8 \cdot 6{,}28 \cdot 4{,}35 \cdot 12{,}53} = 18{,}2 \text{ мккюри/л.} \qquad (12)$$

Вычисленная таким образом удельная радиоактивность воды будет все же несколько занижена, так как в этих расчетах не учтено наличие многократного комптоновского рассеяния излучения в толстых слоях воды, в связи с чем эффективный линейный коэффициент ослабления в этой среде должен быть больше.

Расчет для неразделенного раствора осколков урана

Мощность γ-излучения над поверхностью водоема с радиусом любой величины ($a \geqslant 1$ м), в котором равномерно распределена радиоактивность неразделенного раствора осколков, можно вычислить по уравнению (10),

Таблица 2

Физические постоянные для изотопов неразделенного раствора осколков урана

Изотоп	Период полураспада	Энергия β-излучения (в *Мэв*)		Энергия γ-излучения (в *Мэв*) и интенсивность (в % β-распадов)	γ-постоянная *K* (в рентген/час на 1 мкюри и 1 см расстояния)	Эффективные линейные коэффициенты ослабления (в $см^{-1}$)	
		максимальная	средняя			воды	воздуха
Стронций — 89	53 дня	1,463	0,578	—	—	—	—
Стронций — 90	28 лет	0,61	0,22	—	—	—	—
Иттрий — 90	61 час	2,18	0,90	—	—	—	—
Иттрий — 91	61 день	1,537	0,607	—	—	—	—
Цирконий — 95	65 дней	0,371 (99%)	0,117	0,721 (99%)	4,27	0,082	$99,55 \cdot 10^{-5}$
		0,84 (1%)		0,231 (1%)	—	—	—
Ниобий — 95	35 дней	0,16	0,045	0,745	4,35	0,081	$9,4 \cdot 10^{-5}$
Технеций — 99	$2,12 \cdot 10^5$ лет	0,29	0,09	—	—	—	—
Рутений — 103	39,8 дня	0,217 (~99%)	0,063	0,498	2,95	0,097	$1,12 \cdot 10^{-4}$
		0,698 (~ 1%)					
Рутений — 106	1 год	0,0392	0,0104	—	—	—	—
Родий — 106	30 секунд	3,53 (68%)	—	0,513 (23%)	—	—	—
		3,1 (11%)	1,3	0,624 (12%)	1,36	0,091	$1,055 \cdot 10^{-4}$
		2,44 (12%)	—	1,55 (0,6%)	—	—	—
		2,0 (3%)	—	1,045 (1,8%)	—	—	—
		др. (6%)	—	2,41 (0,23%)	—	—	—
Серебро — 111	7,6 дня	1,04 (91%)	—	0,87 (0,7%)	—	—	—
		0,80 (1%)	0,347	0,243 (1%)	0,17	0,1145	$1,33 \cdot 10^{-4}$
		0,70 (8%)		0,340 (8%)	—	—	—
Кадмий — 115	53 часа	1,11 (58%)	0,35	0,335; 0,360	—	—	—
		0,58 (42%)		0,5; 0,525	—	—	—
Олово — 121, 123	136 дней	1,42	0,31	—	—	—	—
Сурьма — 125	~ 2,4 года	0,616 (18%)		0,637 (11%)	—	—	—
		0,299 (49%)	0,0884	0,601 (11%)	—	—	—
		0,128 (33%)		0,465 (49%)	2,36	0,142	$1,62 \cdot 10^{-4}$
				0,425 (11%)	—	—	—
				0,175 (11%)	—	—	—
				0,145 (18%)	—	—	—
				0,035 (40%)	—	—	—

Таблица 2 (продолжение)

Изотоп	Период полураспада	Энергия β-излучения (в *Мэв*)		Энергия γ-излучения (в *Мэв*) и интенсивность (в % β-распадов)	γ-постоянная *K* (в рентген час. на 1 мкюри и 1 см расстояния)	Эффективные линейные коэффициенты ослабления (в $см^{-1}$)	
		максимальная	средняя			воды	воздуха
Сурьма — 127	93 часа	1,2	0,415	0,72	4,24	0,082	$9,55 \cdot 10^{-5}$
Теллур — 127	115 дней	0,7	0,228	0,089	0,475	$\sim 0,175$	$\sim 2,1 \cdot 10^{-4}$
Теллур — 129	33,5 дня	1,8	0,69	0,106; 0,3, 0,8	6,95	0,12	$1,39 \cdot 10^{-4}$
Теллур — 132	77,7 часа	0,22	0,062	0,231	1,3	0,13	$1,5 \cdot 10^{-4}$
Иод — 131	8,141 дня	0,815 (0,7%)		0,722 (2,8%)	—	—	—
		0,608 (87,2%)	0,178	0,637 (9,3%)			
		0,335 (9,3%)		0,364 (82,9%)	2,35	0,114	$1,33 \cdot 10^{-4}$
		0,25 (2,8%)		0,284 (4,3%)			
				0,08 (4,3%)	—	—	—
				0,163 (0,7%)	—	—	—
Цезий — 136	13,7 дня	0,35	0,102	$\sim 0,9$	5,2	0,074	$8,6 \cdot 10^{-5}$
Цезий — 137	33 года	0,51 (92%)	—	—	—	—	—
		1,17 (8%)	0,174	0,661 (92%)	3,59	0,086	$9,9 \cdot 10^{-5}$
Барий — 140	12,8 дня	1,022 (60%)	0,262	0,54 (30%)	1,74	0,13	$1,5 \cdot 10^{-4}$
				0,3 (10%)			
		0,48 (40%)		0,16 (70%)			
Лантан — 140	40 часов	1,32 (70%) 1,67		0,335 (2%)			
		($\sim$ 20%) 2,26 ($\sim$ 10%)	0,55	0,49 (6)			
				2,3 (5%)			
				0,84 (12%)			
				1,63 (75%)	7,55	0,0609	$7,10 \cdot 10^{-5}$
Церий — 141	33,1 дня	0,581 (33%)	0,146	0,145 (67%)	0,513	0,151	$1,74 \cdot 10^{-4}$
		0,442 (67%)					
Церий — 144	282 дня	0,3 (70%) 0,17	0,074	мягкое излучение			
Празеодим — 143	13,7 дня	0,932	0,304	—	—	—	—
Празеодим — 144	17,5 мин.	2,97 ($>$ 98%)		2,18 (0,733%)	—	—	—
		2,32 ($<$ 1%)	1,14	1,48 (0,266%)	0,123	0,064	$7,35 \cdot 10^{-5}$
		0,81 ($<$ 1%)		0,696 (0,668%)			
Неодим — 147	11,3 дня	0,83 ($\sim$ 60%);		0,532 (25%)			
		0,60 ($\sim$ 15%),		0,318 ($\sim$ 15%)			
		0,38 ($\sim$ 25%)	0,215	0,092 (60%)	1,382	0,146	$1,68 \cdot 10^{-4}$
Прометий — 147	2,6 года	0,223	0,062	—	—	—	—
Европий 155	1,7 года	0,154 (80%)					
		0,243 (20%)	0,047	0,084 и др.	0,455	0,175	$2 \cdot 10^{-4}$

в котором K, μ_1 и μ_2 необходимо заменить эффективными значениями для смеси изотопов, входящих в состав неразделенного раствора осколков.

В этом случае:

$$K_{эф} = \sum_i K_i C_i \tag{13}$$

и

$$\mu_{эф} = \frac{\sum_i \mu_i' C_i}{\sum_i C_i}, \tag{14}$$

где K_i — γ-постоянная; μ_i — эффективный коэффициент ослабления для соответствующего изотопа, присутствующего в неразделенном растворе; C_i — относительное содержание данного изотопа в неразделенном растворе осколков.

Вычисленные по данным, приведенным в табл. 1 и 2, для раствора, в возрасте 30 дней:

$K_{эф} = 2{,}34 r/h$ на 1 мкюри и 1 см расстояния,

$\mu_{2эф} = 0{,}093$ см$^{-1}$ для воды и

$\mu_{1эф} = 1{,}08 \cdot 10^{-4}$ см$^{-1}$ для воздуха,

а для раствора в возрасте 180 дней:

$K_{эф} = 1{,}92 r/h$ на 1 мкюри и 1 см расстояния,

$\mu_{1эф} = 9{,}4 \cdot 10^{-5}$ см$^{-1}$ для воздуха и

$\mu_{2эф} = 0{,}081$ см$^{-1}$ для воды.

На рис. 6 показана зависимость между глубиной радиоактивного водоема и мощностью дозы γ-излучения в воздухе на высоте 1 м от поверхности водоема бесконечно большего радиуса (практически $\geqslant 1$ м); излучение обусловлено равномерно распределенной в воде радиоактивностью осколков урана двух возрастов (30 и 180 дней) при удельной радиоактивности воды 1 мкюри/л.

Как видно из этого рисунка, с увеличением глубины водоема до 10 см, мощность дозы γ-излучения быстро возрастает; при $\sim$ 50 см стремится к пределу в $\sim$0,15 r/h для раствора возрастом 30 дней и $\sim$0,14 r/h для раствора возрастом 180 дней.

Удельная радиоактивность воды в таком водоеме, вызывающая предельно допустимую дозу излучения на высоте 1 м над его поверхностью, будет равна:

$$\rho = \frac{0{,}05 \cdot 1 \text{ мкюри/л}}{8 \cdot 0{,}15} \simeq 0{,}04 \text{ мкюри/л}.$$

Ввиду ограниченности эффективного диаметра водоема (1—2 м) по соображениям симметрии доза излучения на берегу водоема с прямолинейными берегами длиной > 2 м равна половине дозы излучения в его центре, т. е. удельная радиоактивность неразделенного раствора осколков урана в воде, вызывающая предельно допустимую дозу γ-излучения на берегу, должна составлять около 0,08 мкюри/л.

В этих расчетах не учитывалось поглощение γ-излучения в воде путем многократного рассеяния, так как для таких протяженных излучателей нет данных относительно изменения линейных коэффициентов поглощения с толщиной поглотителя.

Помимо γ-излучения, такой водоем будет источником также и β-излучения с достаточно жестким компонентом. Поэтому при определении

допустимой, с точки зрения внешнего облучения, удельной радиоактивности воды в водоемах на это β-излучение нужно внести соответствующую поправку.

Приведенные выше результаты расчетов получены на основании предположения о равномерном распределении радиоактивности молодого раствора осколков по всему объему водоема. В действительности же, как показали опыты с небольшими искусственными водоемами (Тимофеева-Ресовская и Тимофеев-Ресовский, 1952; Тимофеева-Ресовская и др., 1953;

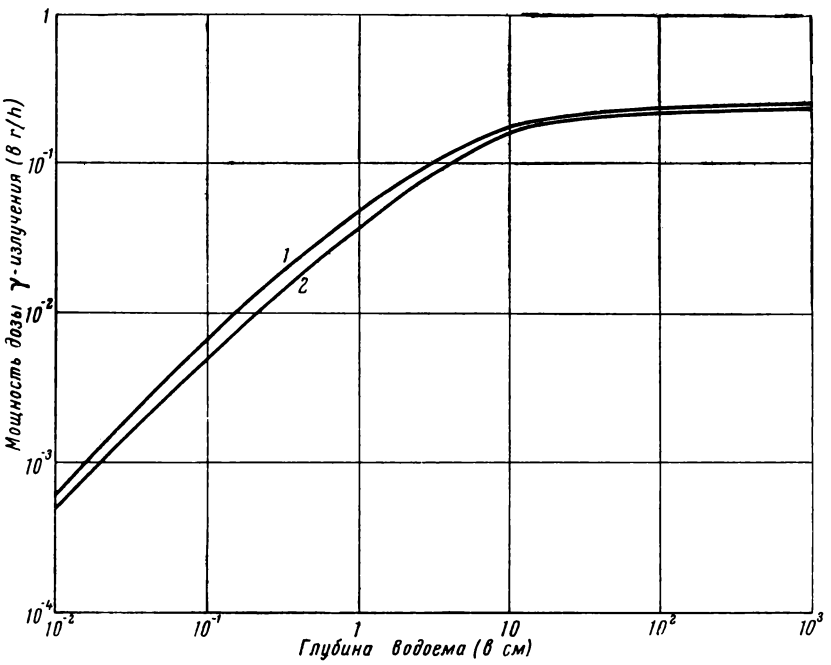


Рис. 6. Изменение мощности дозы γ-излучения (Δ) в воздухе на высоте 1 *м* над поверхностью водоема в зависимости от глубины водоема, в котором раствор осколков урана в возрасте 30 (*1*) или 180 (*2*) дней распределен равномерно с удельной радиоактивностью 1 *мкюри/л*

Тимофеев-Ресовский и Тимофеева-Ресовская, 1954), бóльшая часть радиоактивности, попадающей в водоем (от 60 до 90%), сорбируется дном и живыми организмами водоема. При достаточной глубине водоема (> 1 м) излучение от «донной» радиоактивности неразделенного раствора осколков практически полностью экранируется слоем воды.

Таким образом, увеличение дозы облучения на берегу водоема за счет β-излучения при заданной радиоактивности водоема будет в значительной степени компенсироваться этой неравномерностью распределения активности.

Модельный опыт по измерению дозы γ-излучения вне водоема, в котором равномерно распределена радиоактивность неразделенного раствора осколков урана

Для проверки результатов приближенных расчетов дозы излучения, возникающей вне водоема, при равномерном распределении радиоактивности в нем, в цилиндрическом стеклянном сосуде, диаметром 18,8 см, был приготовлен раствор соответствующей радиоактивности в 2 л воды. Для опытов был взят безбаластный неразделенный раствор осколков урана.

Радиоактивность раствора, измеренная по γ-эквиваленту Ra γ-электроскопом со свинцовыми стенками, толщиной 5 мм, равнялась 53 мкюри. Если ввести поправку на поглощение активности в стенках электроскопа, то действительная радиоактивность раствора составит:

$$A_1 = \frac{A_2 \cdot K_2 \cdot e^{-\mu_2 d}}{K_1 e^{-\mu_1 d}} = 227 \text{ мкюри}, \qquad (15)$$

где A_2 — радиоактивность стандартного препарата ($A_2 = 53$ мкюри); K_2 — γ-постоянная Ra ($K_2 = 8{,}4$ *r/h* на 1 мкюри и 1 см); μ_2 — линейный коэффициент ослабления излучения в свинце ($\mu_2 = 1{,}1$ см$^{-1}$; K_1 — эффективное значение γ-постоянной смеси осколков в растворе полугодичного возраста ($K_1 \cong 1{,}92$ *r/h* на 1 мкюри/л и 1 см); μ_1 — эффективный линейный коэффициент ослабления γ-лучей раствора полугодичного возраста в свинце ($\mu_1 \cong 1{,}062$ см$^{-1}$); d — толщина свинцового фильтра ($d = 5$ мм).

Измеренная малыми конденсаторно-ионизационными камерами из аэриона мощность дозы γ-излучения на расстоянии 12 см над поверхностью воды оказалась равной 0,95 *r/h*.

Для отфильтрования β-излучения раствор был экранирован от камер 4 мм алюминия, на ослабление γ-излучения, в котором была внесена поправка.

Расчетная мощность дозы γ-излучения этого раствора должна была составить 1,15 *r/h*. Расхождение, составляющее 17,4% измеренной величины, по-видимому, объясняется несколько отличающимся от теоретического составом раствора и наличием многократного рассеяния в воде. Измерения без алюминиевого фильтра при толщине стенок камеры в 1 мм показали на этом же расстоянии мощность дозы ~8 *r/h*, а при алюминиевом фильтре в 1 мм — 2,6 *r/h*, т. е. в этом случае мощность дозы β-излучения от открытого водоема в семь раз больше мощности дозы γ-излучения.

Как уже было сказано выше, в естественном водоеме с малым стоком воды около 90% радиоактивности сорбируется дном водоема и водными организмами. Этой неравномерностью распределения радиоактивности в водоеме и компенсируется избыточная доза β-излучения.

Дозы излучения, возникающие внутри водоема при равномерном распределении в нем радиоактивности неразделенного раствора осколков урана

Дозу γ-излучения внутри водоема на определенной глубине при равномерном распределении в этом водоеме радиоактивности неразделенного раствора осколков можно вычислить тем же методом, что и вне водоема, т. е. по уравнению (11) при h = 0, и μ_2 для неразделенного раствора осколков, которое будет составлено из суммы двух таких членов для верхнего и нижнего слоев воды. Ввиду сравнительно небольших линейных размеров водоема, эффективных для γ-излучения неразделенного раствора осколков (около 0,5 м), очевидно, дозы излучения внутри водоема глубиной свыше 1 м будут возрастать с глубиной до некоторого предела, равного двойной дозе γ-излучения на поверхности пруда глубиной 0,5 м.

На рис. 7 для двух возрастов неразделенного раствора осколков показаны кривые зависимости мощности дозы γ-излучения внутри водоема, линейными размерами 0,5 м, от глубины.

Как видно из рисунка, при удельной радиоактивности воды в 1 мкюри/л, мощность дозы γ-излучения не превышает 0,32 *r/h* для раствора 30-дневного возраста и 0,3 *r/h* для раствора 180-дневного возраста. Мощность β-излучения внутри водоема с равномерным распределением

в нем радиоактивности неразделенного раствора осколков может быть вычислена по следующей формуле:

$$\Delta_\beta = \frac{\rho \cdot 3{,}7 \cdot 10^7 \cdot 3600 \cdot 10^6 \cdot \Sigma \bar{E}_i C_i}{W \cdot k \cdot 1000} r/h, \qquad (16)$$

ρ — удельная радиоактивность воды в мкюри/л; $\bar{E}_i$ — средняя энергия β-излучения i-го компонента неразделенного раствора осколков в *MeV*; C_i — относительное содержание активности компонента в неразделенном растворе; W — средняя энергия образования одной пары ионов в воздухе β-частицами ($W = 32{,}5$ *eV*); k — число пар ионов, возникающих в 1 *г* воздуха на 1 г излучения ($K = 1{,}6 \cdot 10^{12}$).

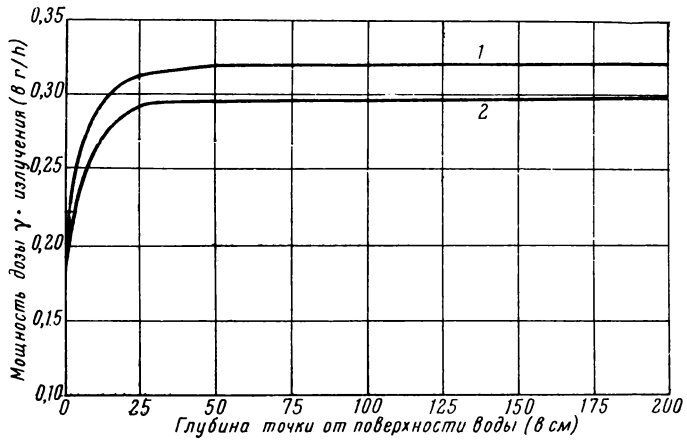


Рис. 7. Зависимость мощности дозы γ-излучения (Δ) внутри водоема с линейными размерами <0,5 м при удельной радиоактивности воды в 1 мкюри/л от глубины точки от поверхности воды.

Для неразделенного раствора осколков возрастом 30 дней $\Sigma \bar{E}_i C_i$, вычисленная по данным табл. 1 и 2, равна 0,34 *MeV*, а для раствора возрастом 180 дней — 0,35 *MeV*. При $\rho = 1$ мощность дозы β-излучения внутри водоема соответственно будет равна:

$\Delta_\beta = 0{,}87$ *r/h* для 30-дневного раствора,
$\Delta_\beta = 0{,}9$ *r/h* для 180-дневного раствора.

Таким образом, мощность дозы смешанного β- и γ-излучения внутри водоема одинакова для растворов обоих возрастов и при удельной радиоактивности воды 1 мкюри/л на глубине свыше 0,5 составляет ~1,2 *r/h*.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Проведенные расчеты позволяют определить величину радиоактивности неразделенного раствора осколков, накапливающейся за определенное время в колодце-кладбище активных отходов, изолированном водоеме или другом хранилище, при равномерной подаче в них радиоактивности, установить верхний предел накопления, а также время, в течение которого радиоактивность стабилизируется на этом предельном уровне. Как видно из этих расчетов, непосредственный сброс сточных вод со смесью радиоактивных изотопов в естественные водоемы открытого типа допустим лишь в незначительных количествах, что практически исключает возможность дезактивации сточных вод путем разведения их в открытых водоемах.

При использовании водоемов открытого типа в качестве отстойников для сточных радиоактивных вод, после прохождения их через специальные очистные сооружения, такие водоемы, по мере накопления в них радиоактивности, сами могут стать излучателями, причем дозы излучения внутри и вне их будут зависеть от удельной радиоактивности воды, а не от общего количества ее в водоеме. При равномерном распределении радиоактивности свежего неразделенного раствора осколков в водоеме эффективные линейные размеры его, с точки зрения внешнего γ-излучения, практически не превышают 1 м. Поэтому доза γ-излучения вне активных водоемов с линейными размерами > 1 м будет одна и та же при одинаковой удельной радиоактивности воды. На берегу пруда на высоте 1 м эта доза не превышает предельно допустимой при радиоактивности воды, содержащей свежий неразделенный раствор осколков, в 80 мккюри/л.

Мощность дозы β и γ-излучения внутри водоема при этой же удельной радиоактивности воды составит $\sim 0{,}1$ *r/h*, т. е. в 16 раз превысит дозу γ-излучения вне водоема.

Приведенные выше соображения и расчеты следует принимать во внимание при устройстве кладбищ радиоактивности, различных хранилищ радиоактивных веществ и отходов, а также при проектировании очистных сооружений и водоемов для дезактивации радиоактивных сточных вод.

ЛИТЕРАТУРА

Горбатюк Н. В., Кач А. З., Тимофеев-Ресовский Н. В. О предельно-допустимых нормах радиоактивного загрязнения воды. Отчет за 1952 г. Свердловск, фонды УФАН СССР.

Тимофеева-Ресовская Е. А., Тимофеев-Ресовский Н. В. Почвенная и биологическая очистка сточных вод, содержащих слабые концентрации растворов излучателей. Отчет за 1952 г. Свердловск, фонды УФАН СССР.

Тимофеева-Ресовская Е. А., Сычева Л. П. и Тимофеев-Ресовский Н. В. Почвенно-биологическая очистка сточных вод, содержащих слабые концентрации растворов излучателей. Отчет за 1953 г. Свердловск, фонды УФАН СССР.

Тимофеев-Ресовский Н. В. и Тимофеева-Ресовская Е. А. Доочистка банно-прачечных вод биологическим путем. Отчет за 1954 г. Свердловск, фонды УФАН СССР.

Янке Е. и Емде Ф. Таблицы функций. М.— Л., ОГИЗ. Гостехиздат, 1948.

Davisson C. a. Evans R. Gamma-ray absorption coefficients. Rev. Mod. Phys., **24**, 79, 1952.

Hollander J. M., Perlman J. a. Seaborg G. T. Table of Isotopes. Rev. Mod. Phys., **25**, 469, 1953.

Marinelli L. D., Brinckerhoff R. F. a. Hine G. J. Average energy of Beta-rays emitted by radioactive isotopes. Rev. Med. Phys., **19**, **25**, 1947.

Sievert R. Die Intensitätsverteilung der primären γ-Strahlung in der Nähe medizinischer Radiumpräparate. Acta Radiologica, **1**, 89—119, 1921.

АКАДЕМИЯ НАУК СССР
УРАЛЬСКИЙ ФИЛИАЛ

Вып. 12 ТРУДЫ ИНСТИТУТА БИОЛОГИИ 1960

Б. М. АГАФОНОВ, Т. И. ДОЛГИХ, М. И. САВЧЕНКО и Н. В. ТИМОФЕЕВ-РЕСОВСКИЙ

РАСПРЕДЕЛЕНИЕ РАССЕЯННЫХ ЭЛЕМЕНТОВ ПО КОМПОНЕНТАМ ВОДОЕМОВ

IV. ОПЫТЫ ПО РАСПРЕДЕЛЕНИЮ СТРОНЦИЯ, РУТЕНИЯ, ЦЕЗИЯ, ЦЕРИЯ И НЕРАЗДЕЛЕННОГО РАСТВОРА ОСКОЛКОВ УРАНА В СЕРИЯХ БАЧКОВ

ВВЕДЕНИЕ

В первом сообщении данной серии были приведены некоторые общие соображения, положенные в основу ряда проводящихся в нашей лаборатории работ по биогеоценологии водоемов. Во втором сообщении этой же серии описаны опыты в наружных установках, состоявших из почвенных фильтров и прудов-отстойников. В предварительных лабораторных опытах были установлены высокие коэффициенты накопления пресноводными организмами всех изучавшихся химических элементов, присутствовавших в ничтожных концентрациях в воде; при изучении коэффициентов накопления применялся метод меченых атомов. Опыты с лабораторными фильтрами, также проводившиеся с применением радиоактивных изотопов, показали сравнительно высокую сорбцию грунтами и почвами тех же химических элементов из водных растворов. Исходя из результатов лабораторных опытов и соответствующих теоретических предпосылок, сотрудниками нашей лаборатории были поставлены упомянутые выше опыты в наружных установках, проводившиеся в течение трех лет. В этих опытах через почвенный фильтр и пруд-отстойник или же через серию из трех прудов пропускался раствор осколков урана концентрацией 10—25 мккюри/л в ежесуточных количествах, составлявших от 1/75 до 1/30 общего объема воды в прудах. Проходившие через почвенный фильтр и пруд или через серию из трех прудов растворы дезактивировались примерно на 99%; иначе говоря, эти установки пропускали лишь около 1% поступавшей в них радиоактивности.

Опыты на наружных установках крупного масштаба весьма громоздки и трудоемки; наконец, они не могут быть достаточно точными ввиду невозможности проведения полного количественного баланса радиоактивности в грунтах и биомассе. В связи с этим нами были проведены опыты по дезактивации воды при пропускании ее через несколько оцинкованных баков, содержащих озерную воду, грунт, водную растительность и соответствующие микропланктон и перифитон. Через серию таких баков можно

пропускать с определенной скоростью любые растворы; благодаря сравнительно небольшим размерам баков по окончании опыта может быть проведен полный баланс радиоактивности со взвешиванием всех компонентов водоемов и точным определением в них концентрации исследуемых элементов. Таким образом, эта методика позволяет в сравнительно короткий срок и при сравнительно небольших затратах труда провести ряд опытов с различными элементами.

В настоящем сообщении описываются результаты ориентировочных опытов, в которых изучалась биологическая очистка воды от слабого раствора неразделенной смеси осколков урана и от четырех важнейших компонентов этой смеси: стронция-90, рутения-106, цезия-137 и церия-144. Целью настоящих опытов являлось выяснение возможных различий в степени дезактивации воды от перечисленных химических элементов при одинаковых условиях опыта, а также установление сходств и различий в распределении этих элементов по основным компонентам водоемов.

МАТЕРИАЛ И МЕТОДИКА

Оцинкованные бачки устанавливались так, что каждый последующий располагался на 2 или 3 см ниже предыдущего. На торцах бачков размером 30 × 25 × 60 см или 45 × 25 × 90 см имелось по патрубку, причем один из них (сточный) располагался несколько ниже другого (вточного). Через эти патрубки бачки соединялись между собой резиновой трубкой. Таким образом, получалась серия бачков, расположенных каскадом, один за другим. В установленные бачки засыпался грунт — озерный песок с тонкой прослойкой плодородной почвы. Затем бачки заливались водой и в них высаживались водные растения (в основном элодея и валлиснерия). В заполненные водой и грунтом и засаженные растениями бачки выпускалось небольшое количество озерного планктона. Бачки оставлялись стоять одну или две недели, чтобы растения как следует укоренились, а планктон прижился и начал нормально размножаться. Таким образом, к началу опыта мы имели серию небольших водоемов-бачков, с более или менее одинаковым составом грунта и биомассы. На рис. 1 приведена схема такой установки.

В течение всего опыта раствор, содержащий невесомое количество радиоактивного изотопа того или иного элемента, поступал в первый бачок из бутыли с нижним тубусом. Радиоактивный раствор проходил через всю серию бачков, и воду, вытекающую из последнего бачка, собирали в градуированную бутыль, установленную в конце серии; это позволяло учесть как количество вытекающей воды, так и ее радиоактивность. В течение всего опыта из бачков брались пробы воды для измерения радиоактивности. В первых опытах пробы воды брали из разных мест и глубин, чтобы определить, нет ли более сильного течения высокоактивной воды через среднюю часть бачка и застоя мало активной воды по его краям. При измерении активности взятых проб не было обнаружено реальной разницы в радиоактивности воды из разных мест бачка, что свидетельствует об очень быстром перемешивании воды. В дальнейшем из середины каждого бачка брали три пробы по 2 мл.

После окончания опытов определялся баланс радиоактивности установки. Методика при этом состояла в следующем: воду из бачков сливали и профильтровывали через беззольные фильтры, на которых задерживалась основная масса планктона. Остаток вместе с беззольными фильтрами переносили в фарфоровые тигли и сжигали. Полученную золу взвешивали, растирали в фарфоровой ступке и готовили из нее пробы для измерения радиоактивности. Таким образом учитывали радиоактивность, содержащуюся в планктоне и детрите. Точно так же обрабатывали чистую

воду, которой были обмыты растения и стенки бачков и в которой находилась основная масса перифитона. Затем с поверхности грунта сначала срезали верхнюю часть растений, а затем осторожно, чтобы не переместить последовательных слоев грунта, вынимали корни. Растения и корни обмывали чистой водой, высушивали до постоянного веса и растирали в порошок. Из растертых растений готовили пробы. У грунта сначала снимали верхний слой толщиной примерно в 1 см, затем весь остаток верхнего слоя песка, почвы и, наконец, весь нижний слой песка. Все слои грунта взвешивали отдельно, тщательно перемешивали и из них брали кратные пробы в фарфоровые чашки. Эти пробы взвешивали, затем высушивали

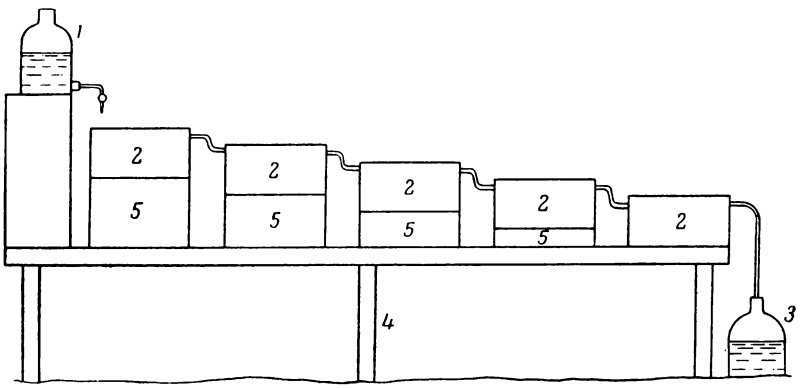


Рис. 1. Общая схема установки бачков

1 — бутыль с исходным раствором; *2* — бачки; *3* — бутыль с поступающей из установки водой; *4* — стеллаж; 5 — деревянные подставки под бачками

и взвешивали вторично; из высушенного грунта готовили пробы для измерения в них радиоактивности. Так учитывалась общая радиоактивность грунта и распределение ее по слоям. Все приготовленные пробы просчитывались на счетной установке типа «Б» в одинаковых условиях.

Проведенный таким образом баланс радиоактивности давал возможность определить степень участия того или иного компонента в дезактивации воды и накоплении радиоактивности.

Мы не останавливаемся подробно на частностях методики проведения разных опытов, так как при изложении материала будут попутно сообщены те или иные отклонения от общей схемы.

РЕЗУЛЬТАТЫ ОПЫТОВ

В этом разделе будут кратко изложены полученные нами данные, причем здесь помещены лишь конечные результаты обработки, а основной сырой материал вынесен в приложения к настоящему сообщению. Так как методика проведения всех опытов была в основном одинакова, то и результаты будут изложены по одной и той же схеме.

Опыты со стронцием

Всего со стронцием было поставлено в разное время три опыта, несколько различавшиеся в методическом отношении. Первый опыт проводился в серии из 10 бачков (установленных на стеллаже под открытым небом), в которую поступало ежесуточно 6 л раствора, содержащего стронций-90 в концентрации примерно 10 мккюри/л. Второй опыт отличался тем, что его проводили в оранжерее, и он продолжался более трех месяцев.

Наконец, третий опыт был поставлен в серии из 9 бачков, причем первый бачок был в два раза большим по объему, чем все остальные. Количество подаваемого раствора было снижено до 3 л в сутки, а концентрация радиоактивности и продолжительность опыта были такими же, как и во втором опыте. Баланс радиоактивности в первом опыте был проведен для всех бачков, во втором — для 1-го, 5-го и 10-го, а в третьем — для 1-го, 3-го, 5-го и 10-го бачков.

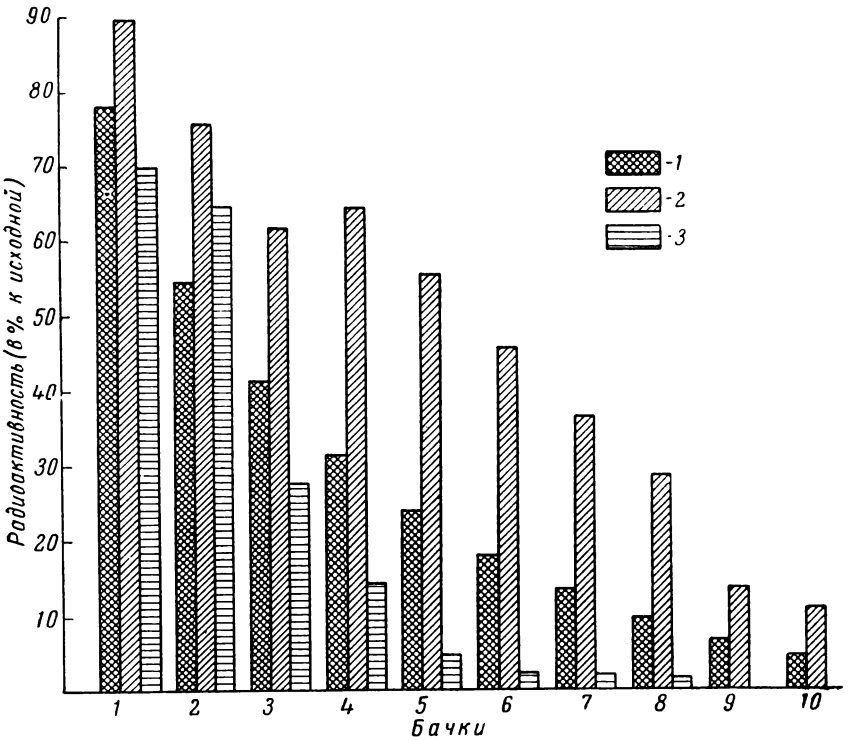


Рис. 2. Изменение удельной радиоактивности по всем бачкам в опытах со стронцием
1 — первый опыт; *2* — второй опыт; *3* — третий опыт

На рис. 2 графически изображено изменение концентрации радиоактивности в воде по бачкам для трех опытов. Как видно из рисунка, стронций в первых двух опытах не полностью задерживается грунтом и биомассой бачков, а проходит до 10-го бачка в количестве 4,5% в первом опыте и 10,8% — во втором. Увеличение радиоактивности в воде последнего бачка во втором опыте можно отнести лишь за счет увеличения срока опыта и, следовательно, увеличения общего количества пропущенной через ряд бачков радиоактивности. Для достижения полного поглощения стронция в грунте и биомассе бачков была несколько изменена методика, а именно — уменьшена суточная подача раствора и увеличен объем первого бачка, т. е. улучшены условия сорбции радиоактивности грунтом и биомассой. Общее же количество воды в серии не изменилось. В результате было достигнуто полное поглощение стронция в грунте и биомассе бачков, несмотря на увеличение поданной активности примерно в 2,5 раза по сравнению с первым опытом. В воде 9-го бачка не удалось обнаружить установимых количеств радиоактивности.

Изучение распределения радиоактивности по компонентам бачка показало следующее.

Грунт был разбит на четыре слоя, причем каждый из них участвовал в балансе как отдельный компонент. В табл. 1 представлено в качестве

Таблица 1

Распределение радиоактивности (в % от общей) по слоям грунта в первом опыте со стронцием

Бачок	Верхний слой песка		Почва	Нижний слой песка
	толщиной в 1 см	остаток		
1-й	60,0	33,3	6,7	0,0
2-й	55,2	33,8	8,8	2,2
3-й	46,7	38,2	9,4	5,7
4-й	46,8	34,8	11,3	7,1
5-й	42,7	42,7	5,2	9,5
6-й	52,3	29,2	10,2	8,3
7-й	49,8	23,7	12,8	13,7
8-й	34,9	29,6	35,5	0,0
9-й	37,9	47,9	14,2	0,0
10-й	55,2	33,3	11,5	0,0
Среднее	51,4	34,8	10,2	3,6

Таблица 2

Вес и радиоактивность отдельных компонентов (в % от общего веса и суммарной радиоактивности) в опытах со стронцием

Бачок	Вода		Грунт		Растения		Прочая биомасса	
	вес	радиоактивность	вес	радиоактивность	вес	радиоактивность	вес	радиоактивность
Первый опыт								
1-й	35,794	27,07	64,175	21,65	0,019	14,72	0,012	36,65
2-й	28,750	28,20	71,225	34,60	0,018	17,90	0,007	19,30
3-й	31,396	32,20	68,579	31,00	0,019	22,60	0,006	14,20
4-й	31,131	31,20	68,848	26,70	0,015	30,70	0,006	11,40
5-й	30,434	40,00	69,544	29,30	0,016	20,70	0,006	10,00
6-й	35,216	47,70	64,764	22,30	0,017	20,80	0,003	9,20
7-й	30,860	37,10	68,120	24,30	0,016	25,20	0,004	12,90
8-й	41,136	44,00	58,840	28,50	0,017	18,70	0,007	8,80
9-й	45,223	41,30	54,755	38,70	0,012	13,30	0,004	6,70
10-й	36,807	55,30	63,174	15,80	0,014	21,80	0,005	7,90
Второй опыт								
1-й	54,585	23,00	54,362	53,00	0,003	0,20	0,050	23,80
5-й	47,516	26,60	52,416	51,30	0,006	2,90	0,062	19,20
10-й	48,998	24,30	50,959	55,20	0,008	1,90	0,035	18,60
Третий опыт								
1-й	74,540	35,160	25,370	47,42	0,060	1,01	0,030	16,41
3-й	82,332	50,670	17,563	35,88	0,088	7,63	0,017	5,82
5-й	75,924	32,900	23,923	26,80	0,086	11,00	0,067	29,30
10-й	77,974	0	21,891	49,19	0,072	16,40	0,063	34,41

примера распределение радиоактивности по слоям грунта в первом опыте со стронцием, в котором проводился полный баланс всей установки.

Как видно из таблицы, в среднем по всем бачкам 86,2% всей активности грунта содержится в верхнем слое песка и лишь 3,6% проникает в нижний слой. В отдельных же бачках, несмотря на большую разницу в абсолютной радиоактивности, не удается обнаружить существенных различий.

В табл. 2 приведены для всех бачков, в которых производился баланс, вес отдельных компонентов и процентное распределение в них радиоактивности в трех опытах. Из таблицы видно, что биомасса бачка, составляющая по весу несколько сотых долей процента, тем не менее играет существенную роль в распределении радиоактивности. Такое несоответствие объясняется очень высокими коэффициентами накопления радиоактивности в биомассе. «Коэффициентом накопления» мы в дальнейшем будем называть отношение концентрации радиоактивности в соответствующем компоненте к концентрации ее в воде.

Коэффициенты накопления и концентрации радиоактивности компонентов приведены в табл. 3. Самым низким коэффициентом накопления обладает грунт, значительно более высоким — растения и так называ-

Таблица 3

Концентрация радиоактивности (в имп/мин на 1 г) и коэффициенты накопления ее отдельными компонентами бачков в опытах со стронцием

Бачок	Компоненты						
	вода	грунт		растения		прочая биомасса	
	концентрация	концентрация	коэффициент накопления	концентрация	коэффициент накопления	концентрация	коэффициент накопления
Первый опыт							
1-й	792	353	0,4	$7{,}9\cdot10^5$	998	$3{,}1\cdot10^6$	3895
2-й	754	373	0,5	$7{,}6\cdot10^5$	1007	$2{,}0\cdot10^6$	2718
3-й	475	209	0,4	$5{,}4\cdot10^5$	1136	$1{,}1\cdot10^6$	2379
4-й	343	161	0,5	$6{,}8\cdot10^5$	1968	$6{,}7\cdot10^5$	1941
5-й	389	125	0,3	$3{,}9\cdot10^5$	996	$3{,}8\cdot10^5$	964
6-й	325	82	0,2	$3{,}0\cdot10^5$	923	$6{,}0\cdot10^5$	1846
7-й	170	50	0,3	$2{,}2\cdot10^5$	1323	$4{,}5\cdot10^5$	2647
8-й	163	74	0,4	$1{,}7\cdot10^5$	1042	$2{,}0\cdot10^5$	1227
9-й	104	81	0,8	$1{,}2\cdot10^5$	1202	$1{,}7\cdot10^5$	1602
10-й	103	17	0,2	$1{,}0\cdot10^5$	971	$1{,}0\cdot10^5$	971
Второй опыт							
1-й	2185	4224	1,9	$2{,}5\cdot10^5$	114	$2{,}0\cdot10^6$	915
5-й	1223	2124	1,7	$1{,}0\cdot10^6$	818	$6{,}7\cdot10^5$	548
10-й	203	447	2,2	$9{,}0\cdot10^4$	443	$2{,}1\cdot10^4$	103
Третий опыт							
1-й	1204	4791	3,9	$4{,}8\cdot10^4$	40	$1{,}5\cdot10^6$	2076
3-й	527	1756	3,3	$7{,}4\cdot10^4$	140	$2{,}9\cdot10^5$	550
5-й	102	263	2,6	$3{,}0\cdot10^4$	294	$1{,}4\cdot10^5$	1372
10-й	0	36	—	$3{,}3\cdot10^3$	—	$8{,}5\cdot10^3$	—

емая «прочая биомасса», к которой мы отнесли планктон, перифитон и детрит, образовавшийся в наших бачках за время опыта. В первых опытах была сделана попытка разделить «прочую биомассу» на ее составляющие. Для этого сначала стеклянным наконечником сифона был собран с поверхностного слоя песка весь образовавшийся детрит. Затем в результате слива и фильтрации основной массы воды был получен более или менее чистый планктон, а омывки растений и стенок бачков дали фракцию перифитона.

Концентрации радиоактивности в планктоне, перифитоне, детрите и соответствующие коэффициенты накопления приведены в табл. 4.

Таблица 4

Концентрация радиоактивности (в имп/мин на 1 г) и коэффициенты накопления ее в растениях, планктоне, перифитоне и детрите для первого опыта со стронцием

Бачок	Растения		Прочая биомасса					
			Планктон		Перифитон		Детрит	
	концентрация	коэффициент накопления	концентрация	коэффициент накопления	концентрация	коэффициент накопления	концентрация	коэффициент накопления
1-й	$7{,}9\cdot10^5$	998	$8{,}7\cdot10^5$	1098	$16{,}2\cdot10^5$	2045	$54{,}2\cdot10^5$	6843
2-й	$7{,}6\cdot10^5$	1007	$18{,}6\cdot10^5$	2467	$13{,}0\cdot10^5$	1724	$49{,}3\cdot10^5$	6538
3-й	$5{,}4\cdot10^5$	1136	$9{,}1\cdot10^5$	1916	$10{,}6\cdot10^5$	2232	$22{,}3\cdot10^5$	4695
4-й	$6{,}8\cdot10^5$	1967	$9{,}4\cdot10^5$	2740	$6{,}6\cdot10^5$	1924	$12{,}4\cdot10^5$	3615
5-й	$3{,}9\cdot10^5$	996	$3{,}9\cdot10^5$	1002	$4{,}9\cdot10^5$	1517	$3{,}7\cdot10^5$	951
6-й	$3{,}0\cdot10^5$	923	$4{,}1\cdot10^5$	1262	$5{,}2\cdot10^5$	1600	$5{,}0\cdot10^5$	1538
7-й	$2{,}2\cdot10^5$	1323	$3{,}3\cdot10^5$	1941	$3{,}1\cdot10^5$	1824	$2{,}8\cdot10^5$	1647
8-й	$1{,}7\cdot10^5$	1043	$5{,}6\cdot10^5$	3436	$2{,}1\cdot10^5$	1288	$0{,}9\cdot10^5$	552
9-й	$1{,}2\cdot10^5$	1202	$3{,}2\cdot10^5$	3077	$1{,}8\cdot10^5$	1731	$0{,}6\cdot10^5$	577
10-й	$1{,}0\cdot10^5$	971	$1{,}6\cdot10^5$	1553	$1{,}7\cdot10^5$	1650	$0{,}6\cdot10^5$	582
Среднее	$4{,}07\cdot10^5$	1156	$6{,}75\cdot10^5$	2049	$6{,}52\cdot10^5$	1754	$15{,}18\cdot10^5$	2754

Из таблицы видно, что наибольшим средним коэффициентом накопления обладает детрит. При сопоставлении коэффициентов накопления в отдельных бачках не обнаруживаются систематические отклонения, несмотря на значительные различия в концентрации радиоактивности воды в последовательно расположенных бачках.

Наконец, на рис. 3 приведено распределение радиоактивности по компонентам в 1-м, 5-м и последнем бачках для всех опытов. Общая площадь круга соответствует всей найденной радиоактивности, сектор — проценту радиоактивности в данном компоненте [1]. Из рисунка ясна роль биомассы в распределении радиоактивности по компонентам.

Полученные в опытах со стронцием результаты можно кратко сформулировать следующим образом. Дезактивация воды в серии бачков при более форсированном режиме протекает неполно: в воде последнего бачка обнаруживается радиоактивность в количестве 4,5% от исходной концентрации в первом опыте и 10,8% — во втором. Снижение количества подаваемого раствора и увеличение объема первого бачка, улучшая условия сорбции, повышают дезактивацию воды, и в последнем бачке

[1] В дальнейшем изложении все подобные рисунки построены по той же схеме.

радиоактивность не обнаруживается. Баланс радиоактивности показал, что наиболее высокие коэффициенты накопления стронция в биомассе. При изучении распределения стронция в различных слоях грунта было обнаружено, что основная масса радиоактивности содержится в нескольких верхних сантиметрах почвы.

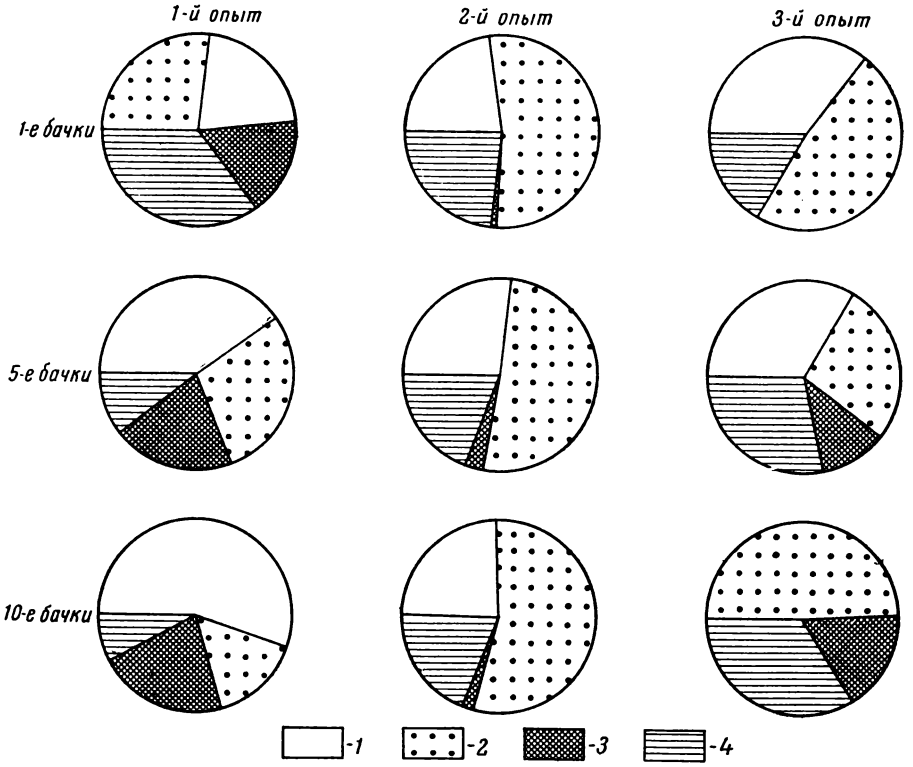


Рис. 3. Распределение радиоактивности (в % от найденной в данном бачке) по основным компонентам в опытах со стронцием

1 — вода, *2* — грунт, *3* — растения, *4* — прочая биомасса

Опыты с рутением

С рутением было проведено два опыта. Первый проводился в течение месяца, второй — 2,5 месяца.

На рис. 4 приведено изменение концентрации радиоактивности в воде для всех бачков обоих опытов в процентах от средней исходной концентрации. Из рисунка видно, что рутений, как и стронций, не полностью дезактивируется в серии бачков, а проходит до десятого бачка в количестве 1,5% от исходной концентрации в первом опыте и 2,5% — во втором. Увеличение количества радиоактивности воды во всех бачках во втором опыте можно отнести только за счет увеличения продолжительности опыта, а следовательно, и количества поступившей в серию радиоактивности.

В табл. 5, как и для опытов со стронцием, дано распределение радиоактивности по глубине грунта в первом опыте.

Из таблицы видно, что в среднем по всем бачкам основная масса радиоактивности сорбируется в двух верхних сантиметрах грунта. Некоторое увеличение радиоактивности в нижнем слое песка можно отнести за счет того, что он по весу составляет почти треть всего грунта.

Таблица 5

Распределение радиоактивности (% от общей) по слоям грунта в первом опыте с рутением

Бачок	Верхний слой песка		Почва	Нижний слой песка
	толщиной в 1 см	остаток		
1-й	66,6	24,1	4,4	4,9
2-й	66,1	15,4	5,6	12,9
3-й	80,7	19,3	0	0
4-й	90,3	9,7	0	0
5-й	100,0	0	0	0
6-й	61,4	38,6	0	0
7-й	81,7	18,3	0	0
8-й	39,9	21,1	27,3	11,7
9-й	25,4	23,8	25,4	25,4
10-й	43,4	48,2	8,4	0
Среднее	67,5	21,1	4,9	6,5

В табл. 6 приведено процентное рапределение компонентов по весу и радиоактивности для бачков, в которых производился баланс в обоих опытах. Данные этой таблицы показывают, что, как и в опыте со

Таблица 6

Вес и радиоактивность отдельных компонентов (в % от общего веса и суммарной радиоактивности) в опытах с рутениеи

Бачок	Вода		Грунт		Растения		Прочая биомасса	
	вес	радиоактивность	вес	радиоактивность	вес	радиоактивность	вес	радиоактивность
				Первый опыт				
1-й	31,414	11,9	68,560	28,0	0,012	10,7	0,014	49,4
2-й	35,921	18,8	64,053	27,2	0,013	11,4	0,013	42,4
3-й	62,015	20,4	37,933	24,9	0,028	10,4	0,024	44,3
4-й	66,372	28,1	33,570	13,3	0,031	15,6	0,027	43,0
5-й	82,829	26,1	17,097	15,9	0,048	21,6	0,026	36,4
6-й	66,223	39,6	33,730	19,0	0,029	12,1	0,018	28,3
7-й	63,977	35,3	35,978	13,7	0,034	13,7	0,011	37,3
8-й	35,514	43,7	64,459	25,6	0,019	12,8	0,008	17,9
9-й	35,154	40,0	64,818	40,0	0,020	8,6	0,008	11,4
10-й	37,195	50,0	62,775	26,9	0,017	7,7	0,013	15,4
				Второй опыт				
1-й	40,259	10,5	59,662	14,7	0,007	6,9	0,052	67,9
5-й	42,839	7,7	57,104	17,7	0,008	0,8	0,049	73,8
10-й	40,937	65,9	58,997	18,6	0,008	10,2	0,058	5,3

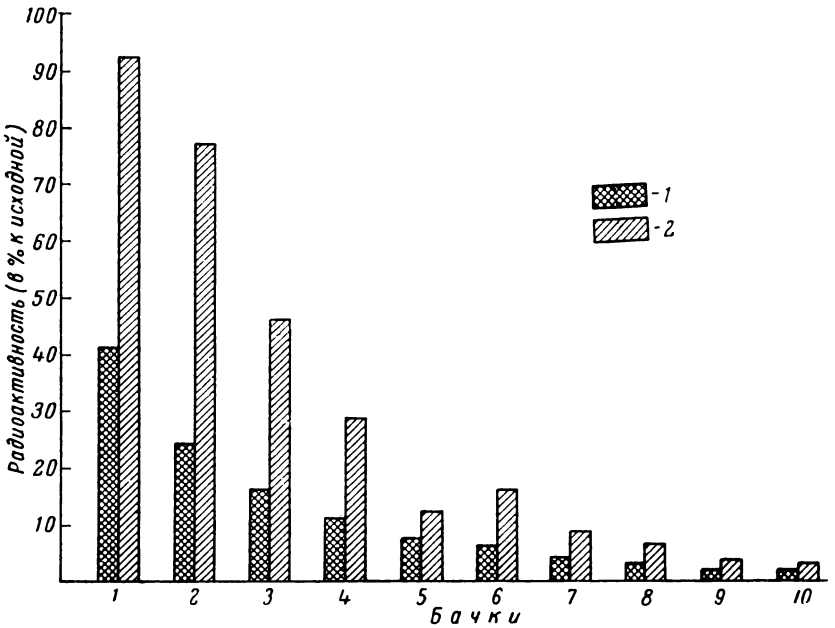


Рис. 4. Изменение удельной радиоактивности по всем бачкам в опытах с рутением

1 — первый опыт, *2* — второй опыт

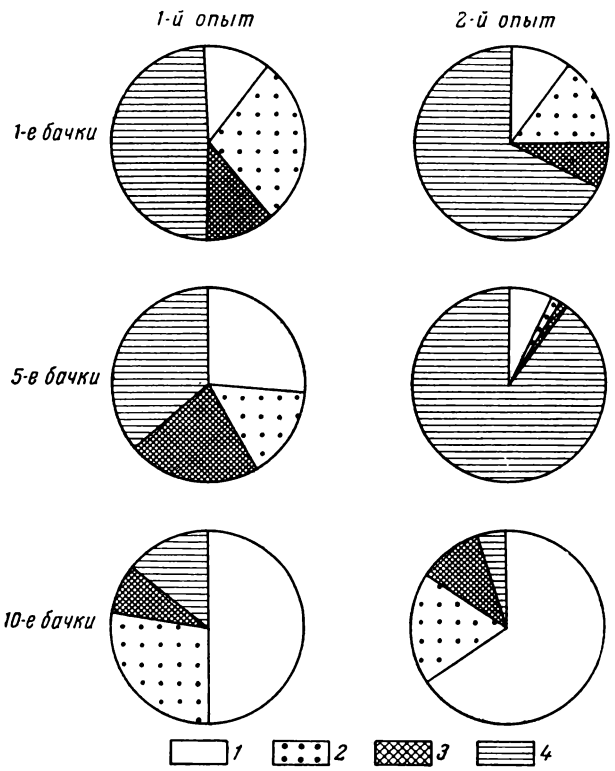


Рис. 5. Распределение радиоактивности (в % от найденной в данном бачке) по основным компонентам в опытах с рутением

1 — вода, *2* — грунт, *3* — растения, *4* — прочая биомасса

стронцием, биомасса, занимая по весу ничтожную долю, в распределении радиоактивности играет существенную роль.

Помещаемая ниже табл. 7 дает представление о концентрации рутения и коэффициентах его накопления в отдельных компонентах бачков.

Таблица 7

Концентрация радиоактивности (в имп/мин на 1 г) и коэффициенты ее накопления отдельными компонентами бачков в опытах с рутением

Бачок	Компоненты						
	Вода	Грунт		Растения		Прочая биомасса	
	концентрация	концентрация	коэффициент накопления	концентрация	коэффициент накопления	концентрация	коэффициент накопления
			Первый опыт				
1-й	818	883	1,1	$18{,}8 \cdot 10^5$	2302	$7{,}5 \cdot 10^6$	9151
2-й	447	363	0,8	$7{,}4 \cdot 10^5$	1661	$2{,}8 \cdot 10^6$	6168
3-й	266	531	2,0	$3{,}0 \cdot 10^5$	1127	$1{,}5 \cdot 10^6$	5563
4-й	203	194	0,9	$2{,}5 \cdot 10^5$	1202	$7{,}9 \cdot 10^5$	3778
5-й	147	334	2,2	$2{,}1 \cdot 10^4$	1435	$6{,}4 \cdot 10^5$	4353
6-й	126	118	0,9	$8{,}8 \cdot 11^4$	694	$3{,}4 \cdot 10^5$	2698
7-й	106	73	0,7	$7{,}8 \cdot 10^4$	736	$6{,}3 \cdot 10^5$	5972
8-й	91	30	0,3	$5{,}0 \cdot 10^4$	549	$1{,}8 \cdot 10^5$	1923
9-й	78	42	0,5	$3{,}0 \cdot 10^4$	385	$1{,}0 \cdot 10^5$	1282
10-й	67	21	0,3	$2{,}2 \cdot 10^4$	282	$5{,}7 \cdot 10^4$	731
			Второй опыт				
1-й	2288	2217	0,96	$8{,}4 \cdot 10^6$	3671	$13{,}5 \cdot 10^6$	5900
5-й	447	815	1,8	$3{,}5 \cdot 10^5$	783	$4{,}0 \cdot 10^6$	8948
10-й	155	30	0,2	$1{,}0 \cdot 10^5$	645	$7{,}6 \cdot 10^3$	49

При рассмотрении коэффициентов накопления биомассы можно отметить их явное падение с увеличением номера бачка, что, по-видимому, зависит от падения концентрации радиоактивности воды от бачка к бачку. Такую же тенденцию можно заметить и у грунта.

В табл. 8 приведены для первого опыта концентрации радиоактивности и коэффициенты накопления рутения растениями и прочей биомассой, разделенной на планктон, перифитон и детрит. Здесь также заметна тенденция снижения коэффициентов накопления с увеличением номера бачка. Наибольшим коэффициентом накопления в опытах с рутением обладает планктон.

На рис. 5 показаны общие результаты баланса для 1-го, 5-го и 10-го бачков в обоих опытах.

Полученные в опытах с рутением результаты можно кратко сформулировать следующим образом. Дезактивация воды, как и в опытах со стронцием, осуществляется не полностью, однако, процент прохождения радиоактивности несколько ниже (1,5—2,5% от исходной). Измерение концентраций радиоактивности компонентов показывает очень высокие коэффициенты накопления рутения биомассой, особенно в первых бачках, и низкие — грунтом, а также некоторое падение коэффициентов накопления с увеличением номера бачка. В грунт рутений проникает несколько

Таблица 8

Концентрация радиоактивности (в имп/мин на 1 г) и коэффициенты накопления ее в растениях, планктоне, перифитоне и детрите в первом опыте с рутением

Бачок	Растения		Прочая биомасса					
			планктон		перифитон		детрит	
	концентрация	коэффициент накопления	концентрация	коэффициент накопления	концентрация	коэффициент накопления	концентрация	коэффициент накопления
1-й	$18{,}8 \cdot 10^5$	2302	$112{,}3 \cdot 10^5$	13 728	$46{,}5 \cdot 10^5$	5684	$82{,}6 \cdot 10^5$	10 098
2-й	$7{,}4 \cdot 10^5$	1661	$61{,}8 \cdot 10^5$	13 825	$23{,}2 \cdot 10^5$	5190	$27{,}2 \cdot 10^5$	6 085
3-й	$3{,}0 \cdot 10^5$	1127	$35{,}3 \cdot 10^5$	13 271	$14{,}1 \cdot 10^5$	5361	$10{,}2 \cdot 10^5$	3 834
4-й	$2{,}5 \cdot 10^5$	1202	$16{,}7 \cdot 10^5$	8 028	$7{,}1 \cdot 10^5$	3413	$6{,}1 \cdot 10^5$	2 932
5-й	$2{,}1 \cdot 10^5$	1435	$15{,}9 \cdot 10^5$	10 817	$4{,}8 \cdot 10^5$	3265	$6{,}2 \cdot 10^5$	4 217
6-й	$8{,}8 \cdot 10^5$	694	$6{,}3 \cdot 10^5$	5 000	$2{,}8 \cdot 10^5$	2222	$3{,}4 \cdot 10^5$	2 698
7-й	$7{,}8 \cdot 10^5$	736	$8{,}8 \cdot 10^5$	8 301	$4{,}3 \cdot 10^5$	4056	$2{,}4 \cdot 10^5$	2 264
8-й	$5{,}0 \cdot 10^5$	549	$5{,}2 \cdot 10^5$	5 714	$1{,}3 \cdot 10^5$	1428	$1{,}7 \cdot 10^5$	1 868
9-й	$3{,}0 \cdot 10^5$	385	$3{,}6 \cdot 10^5$	4 615	$0{,}9 \cdot 10^5$	1153	$0{,}8 \cdot 10^5$	1 025
10-й	$2{,}2 \cdot 10^5$	282	$3{,}2 \cdot 10^5$	4 776	$0{,}6 \cdot 10^5$	895	$0{,}6 \cdot 10^5$	895
Среднее	$6{,}06 \cdot 10^5$	1037	$26{,}91 \cdot 10^5$	8 808	$10{,}56 \cdot 10^5$	3267	$14{,}12 \cdot 10^5$	3 592

хуже, чем стронций. Это видно из того, что в большинстве бачков нижний слой песка, а в некоторых и почва не содержат установимых количеств радиоактивности.

Опыты с цезием

С цезием было проведено два опыта по обычной методике. Раствор, содержащий примерно 10 мккюри/л цезия-137, пропускался через серию из 10 бачков в количестве 6 л в сутки. Первый опыт продолжался в течение одного, второй — в течение трех месяцев; в первом опыте баланс радиоактивности был проведен для всех бачков, во втором — только для 1-го и 5-го бачка.

На рис. 6 показано изменение концентрации радиоактивности воды в бачках в процентах от средней исходной концентрации для первого и второго опытов с цезием. Из рисунка видно, что цезий доходит в установимых количествах только до 7-го бачка. В воде последующих бачков присутствуют только следы радиоактивности, а в 10-м бачке ее вообще невозможно обнаружить. Увеличение срока опыта, а следовательно, и количества поданной радиоактивности не привело ни к каким изменениям в поведении активности в воде, а только увеличило ее концентрацию в воде первого бачка.

Из табл. 9 видно, что 88,2% всей активности грунта поглощаются верхним слоем толщиной в несколько сантиметров. В более глубоких слоях в некоторых бачках уже не обнаруживается никакой радиоактивности.

Данные о распределении радиоактивности и весе компонентов представлены в табл. 10. Несмотря на ничтожный вес биомассы, ее роль в распределении радиоактивности весьма значительна. Однако здесь можно отметить и следующее: основная масса радиоактивности поглощена грунтом.

Таблица 9

Распределение радиоактивности (в % от общей) по слоям грунта в первом опыте с цезием

Бачок	Верхний слой песка		Почва	Нижний слой песка
	толщиной в 1 см	остаток		
1-й	61,9	21,8	7,3	8,7
2-й	55,7	39,8	1,3	3,2
3-й	58,0	42,0	0	0
4-й	80,5	19,5	0	0
5-й	100,0	0	0	0
6-й	26,0	27,4	26,0	20,6
7-й	38,6	48,2	18,2	0
8-й	9,7	11,1	79,2	0
9-й	22,1	6,7	7,7	63,5
10-й	4,4	37,4	42,8	15,4
Среднее	58,9	29,3	5,5	6,3

Таблица 10

Вес и радиоактивность отдельных компонентов (в % от общего веса и суммарной радиоактивности) в опытах с цезием

Бачок	Вода		Грунт		Растения		Прочая биомасса	
	вес	радиоактивность	вес	радиоактивность	вес	радиоактивность	вес	радиоактивность
				Первый опыт				
1-й	36,799	5,6	63,145	57,9	0,025	3,7	0,031	32,8
2-й	36,947	3,8	63,017	67,4	0,017	2,5	0,019	26,3
3-й	61,952	5,0	37,976	58,0	0,040	5,1	0,032	31,9
4-й	69,520	4,1	30,423	57,5	0,027	5,4	0,020	33,0
5-й	94,500	11,3	5,398	23,6	0,059	8,9	0,043	56,2
6-й	48,330	8,6	51,633	48,7	0,017	3,8	0,020	38,9
7-й	55,707	0,0	44,247	42,6	0,022	5,9	0,024	51,5
8-й	60,431	17,1	39,533	63,2	0,013	1,3	0,018	18,4
9-й	38,872	10,3	61,100	76,7	0,016	0,9	0,012	12,1
10-й	24,266	3,9	75,696	88,2	0,024	1,3	0,024	6,6
				Второй опыт				
1-й	43,571	6,3	56,248	76,1	0,045	8,3	0,136	9,3
5-й	49,911	2,9	56,965	91,8	0,055	2,2	0,069	3,1

В табл. 11 приведены концентрации радиоактивности и коэффициенты накопления цезия отдельными компонентами бачков для всех опытов и всех бачков, участвовавших в балансе. Данные этой таблицы вновь указывают на высокие коэффициенты накопления активности биомассой. Кроме того, в опытах с цезием обращают на себя внимание сравнительно высокие коэффициенты накопления активности грунтом.

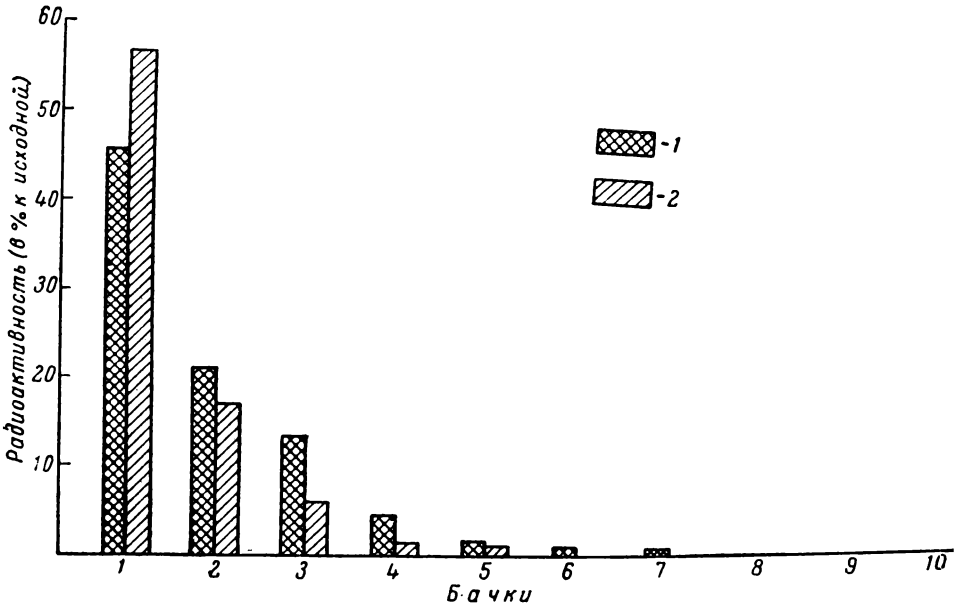


Рис. 6. Изменение удельной радиоактивности по всем бачкам в опытах с цезием

1 — первый опыт, *2* — второй опыт

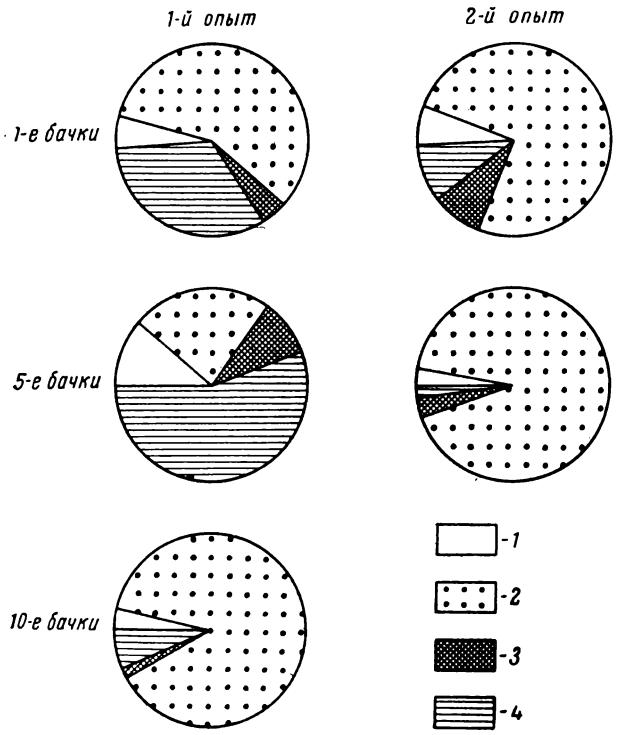


Рис. 7. Распределение радиоактивности (в % от найденной в данном бачке) по основным компонентам в опытах с цезием

1 — вода, *2* — грунт, *3* — растения, *4* — прочая биомасса

При рассмотрении данных табл. 12 видно, что наибольшим средним коэффициентом накопления обладает планктон.

На рис. 7 изображено процентное распределение радиоактивности по компонентам бачков, причем для первого опыта приведены данные по

Таблица 11

Концентрация радиоактивности (в имп/мин на 1 г) и коэффициенты ее накопления разными компонентами бачков в опытах с цезием

Бачок	Компоненты						
	вода	грунт		растения		прочая биомасса	
	концентрация	концентрация	коэффициент накопления	концентрация	коэффициент накопления	концентрация	коэффициент накопления
			Первый опыт				
1-й	270	1619	5,9	2,5·10	966	1,9·10	6 889
2-й	88	919	10,4	1,2·10	1398	1,2·10	13 198
3-й	56	1061	18,9	8,8·10	1750	6,8·10	12 178
4-й	12	389	32,4	3,3·10	2750	3,4·10	27 916
5-й	13	475	36,5	1,6·10	1254	1,4·10	10 961
6-й	6	32	5,3	8,0·10	1333	6,8·10	11 250
7-й	0	18	—	5,0·10	—	3,9·10	—
8-й	5	27	5,4	1,2·10	2500	1,8·10	3 500
9-й	6	29	4,8	1,2·10	2083	2,3·10	3 883
10-й	3	21	7,0	1,0·10	383	5,0·10	16 666
			Второй опыт				
1-й	950	8800	9,3	1,2·10	1263	4,5·10	474
5-й	18	433	24,0	1,1·10	611	1,2·10	667

Таблица 12

Концентрация радиоактивности (в имп/мин на 1 г) и коэффициенты ее накопления в растениях, планктоне, перифитоне и детрите в первом опыте с цезием

Бачок	Растения		Прочая биомасса					
			планктон		перифитон		детрит	
	концентрация $\times 10^3$	коэффициент накопления	концентрация $\times 10^3$	коэффициент накопления	концентрация $\times 10^3$	коэффициент накопления	концентрация $\times 10^3$	коэффициент накопления
1-й	260	966	3273	12 122	1867	5 888	1590	6 914
2-й	120	1398	1826	20 750	1334	8 534	751	16 159
3-й	88	1756	557	9 946	964	9 821	550	12 214
4-й	33	2750	381	31 750	400	26 750	321	33 333
5-й	16	1254	248	19 077	234	7 154	93	18 000
6-й	8	1333	185	30 833	102	8 333	50	17 000
7-й	50	—	61	—	84	—	21	—
8-й	12	2500	46	7 200	42	2 200	11	8 400
9-й	12	2093	40	6 666	14	1 000	6	2 833
10-й	1	333	15	5 000	7	1 333	4	2 333
Среднее	60,0	1437	663,2	14 334	504,	7 101	339,7	11 568

1-му, 5-му и 10-му бачкам, а для второго — по 1-му и 5-му. В распределении цезия по разным компонентам бачков основную роль играет грунт.

На основании опытов с цезием можно отметить следующее: дезактивация воды в бачках протекает очень полно: в воде последнего бачка не обнаруживается установимых количеств радиоактивности; между тем грунт и особенно биомасса последнего бачка содержат вполне установимые количества радиоактивности. Распределение ее по компонентам бачков указывает на то, что в дезактивации воды в опытах с цезием основную роль играет грунт, на что также указывают и его сравнительно высокие коэффициенты накопления. Распределение радиоактивности в грунте показало преимущественную сорбцию цезия в верхних слоях и плохое проникновение его в глубжележащие слои.

Опыты с церием

С церием было проведено три опыта. Первый опыт проводился по обычной методике в течение примерно одного месяца, второй — в течение трех месяцев, а третий был поставлен в серии из 9 бачков, из которых первый был в два раза больше остальных; в этом опыте количество ежесуточно пропускаемого раствора было уменьшено с 6 до 3 л. Концентрация радиоактивности во всех опытах составляла 10 мккюри/л.

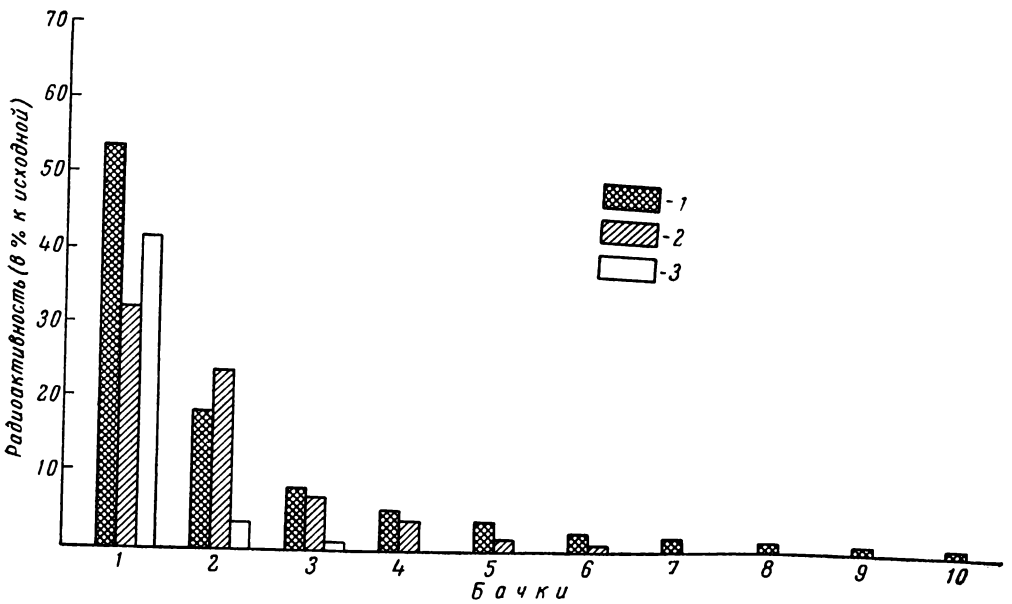


Рис. 8. Изменение удельной радиоактивности по всем бачкам в опытах с церием

1 — первый опыт, *2* — второй опыт, 3 — третий опыт

Данные по дезактивации воды от церия показывают, что он только в первом опыте проходит до 10-го бачка в установимых количествах (рис. 8). Это можно объяснить тем, что данный опыт был поставлен под открытым небом и совпал с сезоном дождей, из-за чего имел место усиленный проток воды и, следовательно, «проталкивание» радиоактивности в последние бачки серии. Во втором и особенно в третьем опыте наблюдалась полная дезактивация воды от церия.

Распределение радиоактивности в грунте представлено в табл. 13. Из таблицы видно, что основная масса радиоактивности содержится в верхнем слое грунта. В некоторых бачках в почву и особенно в нижний слой песка церий вообще не проникает.

В табл. 14 приведено процентное распределение веса и радиоактивности компонентов в трех опытах для всех бачков, в которых производился баланс. Из таблицы явствует, что основная масса радиоактивности сосредоточена в биомассе, а грунт в этом случае играет второстепенную роль.

Таблица 13

Распределение радиоактивности (в % от общей) по слоям грунта в первом опыте с церием

Бачок	Верхний слой песка		Почва	Нижний слой песка
	толщиной в 1 см	остаток		
1-й	50,4	40,3	4,5	4,8
2-й	60,3	28,2	11,5	0
3-й	43,2	16,0	21,5	19,3
4-й	35,9	18,7	20,5	24,9
5-й	100,0	0	0	0
6-й	64,2	35,8	0	0
7-й	20,4	32,3	47,3	0
8-й	100,0	0	0	0
9-й	10,9	6,4	46,4	36,3
10-й	26,9	73,1	0	0
Среднее	50,3	33,9	9,3	6,5

Таблица 14

Вес и радиоактивность отдельных компонентов (в % от общего веса и суммарной радиоактивности) в опытах с церием

Бачок	Вода		Грунт		Растения		Прочая биомасса	
	вес	радиоактивность	вес	радиоактивность	вес	радиоактивность	вес	радиоактивность
				Первый опыт				
1-й	33,754	4,8	66,206	34,5	0,027	12,4	0,012	48,3
2-й	52,764	4,7	41,188	33,3	0,028	15,6	0,020	46,4
3-й	32,719	4,7	67,258	46,2	0,017	16,0	0,006	30,1
4-й	36,002	7,3	63,968	45,8	0,022	14,6	0,008	32,3
5-й	89,348	9,7	10,577	12,9	0,050	22,6	0,025	54,8
6-й	67,316	10,0	36,625	25,0	0,045	15,0	0,014	50,0
7-й	52,502	4,3	47,452	56,6	0,035	13,0	0,011	26,1
8-й	90,846	10,0	9,084	20,0	0,056	20,0	0,014	50,0
9-й	37,418	20,0	62,552	53,3	0,024	6,7	0,006	20,0
10-й	68,542	14,3	31,399	28,6	0,044	14,3	0,015	42,8
				Второй опыт				
1-й	50,330	1,7	49,603	48,3	0,012	9,1	0,055	40,9
5-й	42,505	5,4	57,484	30,4	0,007	8,7	0,004	55,5
10-й	39,473	17,5	60,414	74,3	0,006	0,3	0,107	7,9
				Третий опыт				
1-й	83,483	3,2	16,293	36,0	0,063	15,3	0,161	45,5
3-й	78,873	21,3	20,959	15,6	0,076	32,6	0,092	30,5
9-й	79,572	6,8	20,265	81,9	0,081	3,8	0,082	7,5

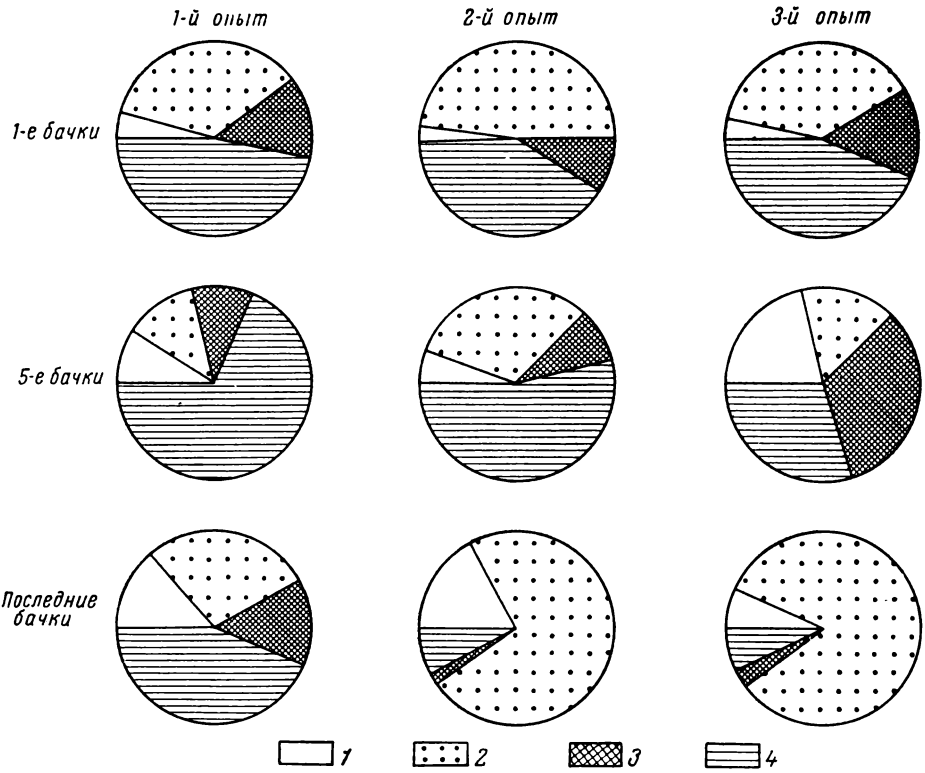


Рис. 9. Распределение радиоактивности (в % от найденной в данном бачке) по основным компонентам в опытах с церием

1 — вода, *2* — грунт, *3* — растения, *4* — прочая биомасса

Коэффициенты накопления, приведенные в табл. 15, также указывают на преимущественную сорбцию церия «прочей биомассой», к которой, как уже было упомянуто, относятся планктон, перифитон и детрит.

Грунту также присущи сравнительно высокие коэффициенты накопления, однако, они перекрываются очень высокими коэффициентами накопления активности биомассы, в связи с чем в дезактивации воды от церия основную роль играет биомасса. Особенно наглядно это видно из данных табл. 16, где приведены коэффициенты накопления церия растениями, планктоном, перифитоном и детритом, причем коэффициенты накопления биомассы достигают 50 000 и более. На преимущественную сорбцию церия биомассой указывает также рис. 9, где приведено распределение церия по компонентам. Опыты с церием позволяют сделать следующее заключение: при пропускании через серию бачков дезактивация воды протекает очень полно; церий целиком поглощается грунтом и биомассой бачков. Результаты баланса показывают, что основная масса церия сосредоточивается в биомассе; в глубжележащие слои грунта церий проникает так же, как и цезий.

Опыты с раствором осколков урана

Для проведения опытов с раствором осколков урана использовалась смесь изотопов, получающаяся в результате деления урана и состоящая в основном из стронция-90, ниобия-95, циркония-95, рутения-106, цезия-137, церия-144 и некоторых других изотопов, содержащихся в этом растворе в незначительных количествах. С таким раствором было поставлено

Таблица 15

Концентрация радиоактивности (в имп/мин на 1 г) и коэффициенты ее накопления разными компонентами бачков в опытах с церием

Бачок	Компоненты						
	вода	грунт		растения		прочая биомасса	
	концентрация	концентрация	коэффициент накопления	концентрация	коэффициент накопления	концентрация	коэффициент накопления
			Первый опыт				
1-й	414	1 530	3,7	$1{,}3 \cdot 10^6$	3 251	$11{,}4 \cdot 10^6$	27 454
2-й	114	907	8,0	$7{,}0 \cdot 10^5$	6 140	$3{,}0 \cdot 10^6$	26 184
3-й	70	230	2,9	$3{,}1 \cdot 10^5$	3 955	$1{,}6 \cdot 10^6$	19 823
4-й	39	139	3,6	$1{,}3 \cdot 10^5$	2 256	$7{,}8 \cdot 10^5$	19 872
5-й	17	188	11,0	$7{,}0 \cdot 10^4$	4 117	$3{,}4 \cdot 10^5$	20 000
6-й	10	53	5,3	$2{,}3 \cdot 10^4$	2 300	$2{,}5 \cdot 10^5$	25 000
7-й	4	73	18,2	$2{,}3 \cdot 10^4$	5 775	$1{,}5 \cdot 10^5$	37 500
8-й	4	40	10,0	$1{,}7 \cdot 10^4$	4 150	$1{,}7 \cdot 10^5$	41 500
9-й	16	26	1,6	$8{,}3 \cdot 10^3$	518	$1{,}0 \cdot 10^5$	6 250
10-й	5	24	4,8	$8{,}3 \cdot 10^3$	1 667	$7{,}5 \cdot 10^4$	14 200
			Второй опыт				
1-й	3541	10 260	2,9	$8{,}06 \cdot 10^6$	2 273	$7{,}77 \cdot 10^6$	2 194
5-й	20	82	4,1	$2{,}02 \cdot 10^5$	10 100	$2{,}17 \cdot 10^6$	108 500
10-й	5	15	3,0	651	130	917	183
			Третий опыт				
1-й	337	19 277	57,2	$2{,}1 \cdot 10^6$	6 231	$2{,}4 \cdot 10^6$	7 122
3-й	34	94	2,8	$5{,}4 \cdot 10^4$	1 588	$4{,}1 \cdot 10^4$	1 205
9-й	2	73	36,5	856	428	1639	819

Таблица 16

Концентрация радиоактивности (в имп/мин на 1 г) и коэффициенты ее накопления в растениях, планктоне, перифитоне и детрите в первом опыте с церием

Бачок	Растения		Прочая биомасса					
			планктон		перифитон		детрит	
	концентрация	коэффициент накопления	концентрация	коэффициент накоплени	концентрация	коэффициент накопления	концентрация	коэффициент накопления
1-й	$130 \cdot 10^4$	3251	$1930 \cdot 10^4$	46 618	$929 \cdot 10^4$	22 439	$1070 \cdot 10^4$	25 345
2-й	$70 \cdot 10^4$	6140	$476 \cdot 10^4$	41 754	$392 \cdot 10^4$	34 385	$260 \cdot 10^4$	22 307
3-й	$31 \cdot 10^4$	3955	$166 \cdot 10^4$	21 012	$160 \cdot 10^4$	20 253	$159 \cdot 10^4$	20 126
4-й	$13 \cdot 10^4$	2256	$132 \cdot 10^4$	33 846	$83 \cdot 10^4$	21 282	$77 \cdot 10^4$	19 743
5-й	$7 \cdot 10^4$	4117	$60 \cdot 10^4$	35 294	$37 \cdot 10^4$	21 764	$29 \cdot 10^4$	17 058
6-й	$2{,}3 \cdot 10^4$	2300	$26 \cdot 10^4$	26 000	$28 \cdot 10^4$	28 000	$17 \cdot 10^4$	17 000
7-й	$2{,}3 \cdot 10^4$	5775	$13 \cdot 10^4$	32 500	$15 \cdot 10^4$	37 500	$15 \cdot 10^4$	37 500
8-й	$1{,}7 \cdot 10^4$	4150	$21 \cdot 10^4$	52 500	$13 \cdot 10^4$	32 500	$14 \cdot 10^4$	35 000
9-й	$0{,}8 \cdot 10^4$	518	$18 \cdot 10^4$	11 250	$7 \cdot 10^4$	4 375	$9 \cdot 10^4$	5 625
10-й	$0{,}8 \cdot 10^4$	1667	$11 \cdot 10^4$	22 000	$6 \cdot 10^4$	12 000	$6 \cdot 10^4$	12 000
Среднее	$25{,}9 \cdot 10^4$	3413	$285{,}3 \cdot 10^4$	32 277	167,0	23 450	$165{,}6 \cdot 10^4$	21 170

три опыта: первый проводили месяц, второй — 3 месяца. Третий опыт проводился в серии из 8 бачков, в которой первый и последний бачки были заменены в два раза большими по объему, чем остальные; суточная подача раствора была уменьшена с 6 до 3 л, а продолжительность опыта увеличена до полугода. Концентрация радиоактивности в подаваемом в бачки растворе во всех опытах составляла 10 мккюри/л по β-излучению.

На рис. 10 показано изменение концентрации радиоактивности в воде для первого, второго и третьего опытов. Радиоактивность прошла до 10-го

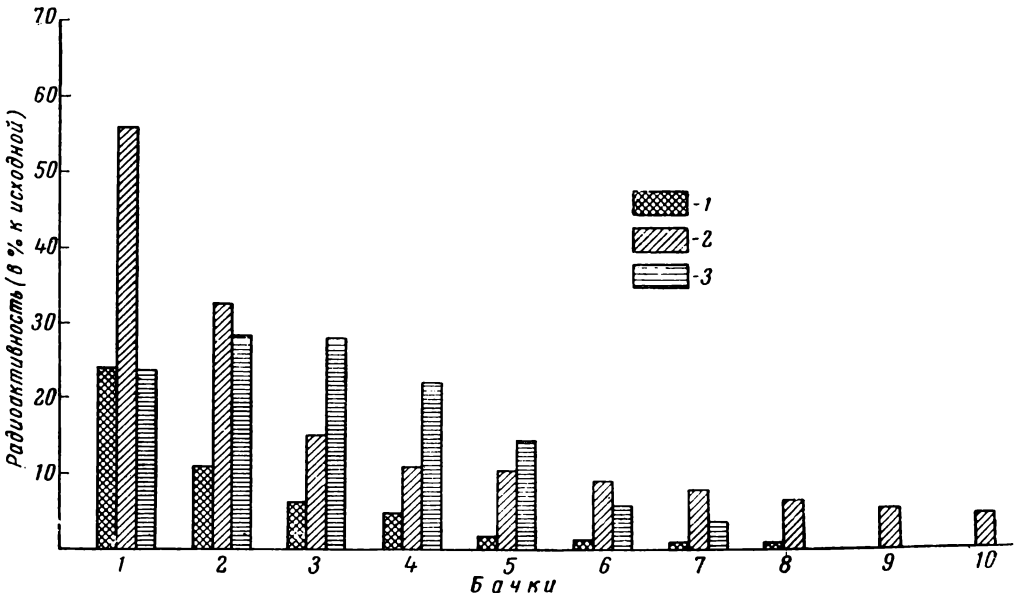


Рис. 10. Изменение удельной радиоактивности по всем бачкам в опытах с раствором осколков урана

1 — первый опыт, *2* — второй опыт, *3* — третий опыт

бачка только во втором опыте. Это объясняется тем, что второй опыт продолжался три месяца и, следовательно, количество поданной радиоактивности увеличилось в три раза по сравнению с первым опытом. В третьем опыте количество ежесуточно подаваемого раствора было сокращено вдвое. Однако срок опыта был увеличен до полугода и, таким образом, общее количество поданной в серию радиоактивности осталось таким же, как и во втором опыте. Сокращение суточной подачи раствора и замена первого и последнего бачков в два раза большими по объему значительно улучшили условия сорбции, в результате чего радиоактивность в воде последнего бачка появилась лишь в самом конце опыта, да и то в ничтожной концентрации (примерно 0,2% от исходной).

Как и во всех уже описанных опытах, основная масса радиоактивности поглощалась верхним слоем грунта толщиной в несколько сантиметров (табл. 17). Общая же картина распределения радиоактивности по слоям грунта напоминает таковую в опытах со стронцием. Это, по-видимому, объясняется тем, что во взятом для опытов растворе осколков урана важное место занимал стронций.

Результаты баланса для опытов с раствором осколков урана приведены в табл. 18, где дано процентное распределение радиоактивности и веса компонентов для всех опытов. Данные этой таблицы показывают, что и в этих опытах биомасса, составляя по весу ничтожную долю, играет весьма существенную роль в балансе радиоактивности.

Таблица 17

Распределение радиоактивности (в % от общей) по слоям грунта в первом опыте с раствором осколков урана

Бачок	Верхний слой песка		Почва	Нижний слой песка
	толщиной в 1 см	остаток		
1-й	57,8	32,9	8,7	0,6
2-й	39,8	37,5	17,7	4,9
3-й	65,9	28,8	3,6	1,7
4-й	29,6	44,4	12,1	13,9
5-й	23,2	21,3	18,1	37,4
6-й	14,2	43,7	7,9	34,2
7-й	5,2	59,4	35,4	0
8-й	18,7	27,1	18,8	35,4
9-й	0	47,1	52,9	0
10-й	Не разбирался			
Среднее	52,3	33,4	10,4	3,9

Таблица 18

Вес и радиоактивность отдельных компонентов (в % от общего веса и суммарной радиоактивности) в опытах с раствором осколков грунта

Бачок	Вес				Радиоактивность			
	вода	грунт	растения	прочая биомасса	вода	грунт	растения	прочая биомасса
				Первый опыт				
1-й	42,865	57,071	0,040	0,024	0,80	41,10	7,40	50,70
2-й	39,939	60,030	0,024	0,007	3,36	42,44	11,11	43,09
3-й	41,873	58,091	0,024	0,012	3,37	66,68	5,48	24,47
4-й	38,990	60,955	0,041	0,014	3,48	61,64	9,30	25,58
5-й	41,504	58,442	0,040	0,014	6,66	65,10	8,33	20,00
6-й	41,761	58,184	0,042	0,001	3,33	76,68	3,33	16,66
7-й	49,819	50,111	0,050	0,020	11,76	58,84	11,76	17,64
8-й	43,962	55,988	0,038	0,012	7,57	90,93	0,75	0,75
				Второй опыт				
1-й	43,283	56,665	0,016	0,036	2,54	58,86	5,96	32,64
4-й	69,469	30,477	0,006	0,058	19,83	36,96	2,69	40,52
7-й	47,067	52,891	0,014	0,028	26,05	54,15	5,02	14,78
10-й	95,021	4,881	0,016	0,082	55,91	11,98	0,16	31,95
				Третий опыт				
1-й	64,378	35,226	0,064	0,332	4,3	18,7	4,8	72,2
2-й	60,099	39,664	0,031	0,226	37,1	42,9	4,3	15,7
3-й	71,077	28,620	0,084	0,219	41,1	20,6	14,7	23,6
4-й	67,996	31,777	0,049	0,178	47,8	26,2	4,3	21,5
5-й	65,857	33,859	0,061	0,223	58,3	16,7	8,3	16,7
6-й	67,597	32,205	0,040	0,158	46,1	30,8	7,7	15,4
7-й	67,615	32,224	0,019	0,122	37,5	41,7	8,3	12,5
8-й	81,393	18,559	0,016	0,032	24,1	48,2	3,6	24,1

В табл. 19 приведены концентрации радиоактивности и коэффициенты накопления для всех бачков в трех опытах. Из таблицы видно, что наибольшими коэффициентами накопления обладает по-прежнему биомасса; особенно высоки они в первом опыте.

Таблица 19

Концентрация радиоактивности (в имп/мин на 1 *г*) и коэффициенты ее накопления разными компонентами бачков в опытах с раствором осколков урана

Бачок	Компоненты						
	вода	грунт		растения		прочая биомасса	
	концентрация	концентрация	коэффициент накопления	концентрация	коэффициент накопления	концентрация	коэффициент накопления
			Первый опыт				
1-й	90	355	3,9	$8{,}9\cdot10^5$	9869	$10{,}4\cdot10^6$	115 111
2-й	61	508	8,3	$3{,}3\cdot10^5$	5409	$4{,}3\cdot10^6$	69 945
3-й	46	634	13,7	$1{,}3\cdot10^5$	2826	$1{,}2\cdot10^6$	25 217
4-й	19	214	11,2	$4{,}7\cdot10^4$	2476	$3{,}7\cdot10^5$	19 298
5-й	23	159	6,9	$2{,}9\cdot10^4$	1278	$2{,}0\cdot10^5$	8 695
6-й	6	93	15,5	$5{,}5\cdot10^3$	925	$1{,}0\cdot10^5$	16 666
7-й	6	29	4,8	$5{,}9\cdot10^3$	980	$2{,}1\cdot10^4$	3 571
8-й	11	147	13,3	$1{,}2\cdot10^3$	113	$4{,}0\cdot10^3$	364
			Второй опыт				
1-й	343	5892	17,2	$2{,}0\cdot10^6$	5831	$5{,}2\cdot10^6$	15 160
4-й	130	546	4,2	$2{,}0\cdot10^5$	1538	$2{,}8\cdot10^5$	2 154
7-й	94	176	1,9	$6{,}0\cdot10^4$	638	$9{,}2\cdot10^4$	979
10-й	59	245	4,2	$1{,}0\cdot10^3$	17	$3{,}9\cdot10^4$	661
			Третий опыт				
1-й	457	3674	8,0	$5{,}3\cdot10^5$	1160	$1{,}4\cdot10^6$	3 063
2-й	593	1115	1,9	$1{,}4\cdot10^5$	238	$0{,}7\cdot10^5$	118
3-й	561	699	1,2	$1{,}7\cdot10^5$	303	$1{,}0\cdot10^5$	178
4-й	451	526	1,2	$6{,}8\cdot10^4$	151	$7{,}9\cdot10^4$	175
5-й	329	161	0,5	$4{,}8\cdot10^4$	146	$2{,}5\cdot10^4$	76
6-й	100	141	1,4	$2{,}8\cdot10^4$	280	$1{,}7\cdot10^4$	170
7-й	37	86	2,3	$2{,}9\cdot10^4$	784	$6{,}9\cdot10^3$	188
8-й	5	44	8,8	$3{,}7\cdot10^3$	740	$1{,}3\cdot10^4$	2 600

При рассмотрении коэффициентов накопления активности планктоном, перифитоном и детритом (табл. 20) видно, что наиболее высокие коэффициенты накопления присущи планктону; так, в 1-м бачке он достигает почти 300 000.

На рис. 11 показано распределение радиоактивности по компонентам бачков. Здесь особенно ясно видна роль биомассы в распределении радиоактивности по компонентам бачков.

Подводя итоги, можно отметить следующее: дезактивация воды в опытах с раствором осколков урана протекает очень полно. Исключение составляет лишь второй опыт, где в связи с увеличением срока опыта соответственно возросло и количество поданной в серию активности и, вместе с тем, увеличилось относительное количество таких, сравнительно плохо дезактивирующихся компонентов раствора осколков урана, как стронций и рутений. Улучшение условий сорбции, т. е. уменьшение суточной подачи

Таблица 20

Концентрация радиоактивности (в имп/мин на 1 г) и коэффициенты накопления для растений, планктона, перифитона и детрита в первом опыте с раствором осколков урана

Бачок	Растения		Прочая биомасса					
			планктон		перифитон		детрит	
	концентрация $\times 10^3$	коэффициент накопления	концентрация $\times 10^3$	коэффициент накопления	концентрация $\times 10^3$	коэффициент накопления	концентрация $\times 10^3$	коэффициент накопления
1-й	890,0	9869	26 482	294 244	7504	83 377	10 689	118 766
2-й	330,0	5409	5 130	84 098	3582	58 721	3 772	61 835
3-й	130,0	2826	1 737	37 695	968	21 048	1 140	24 782
4-й	47,0	2476	736	38 736	681	35 842	335	17 631
5-й	29,0	1278	273	11 869	235	10 217	162	7 043
6-й	5,5	925	92	15 330	105	17 500	79	13 167
7-й	5,9	980	112	18 666	22	3 666	31	5 167
8-й	1,2	113	24	2 181	12	1 091	7	636
Среднее	143,76	2984	3457,9	62 877	1308,9	28 933	1621,5	32 128

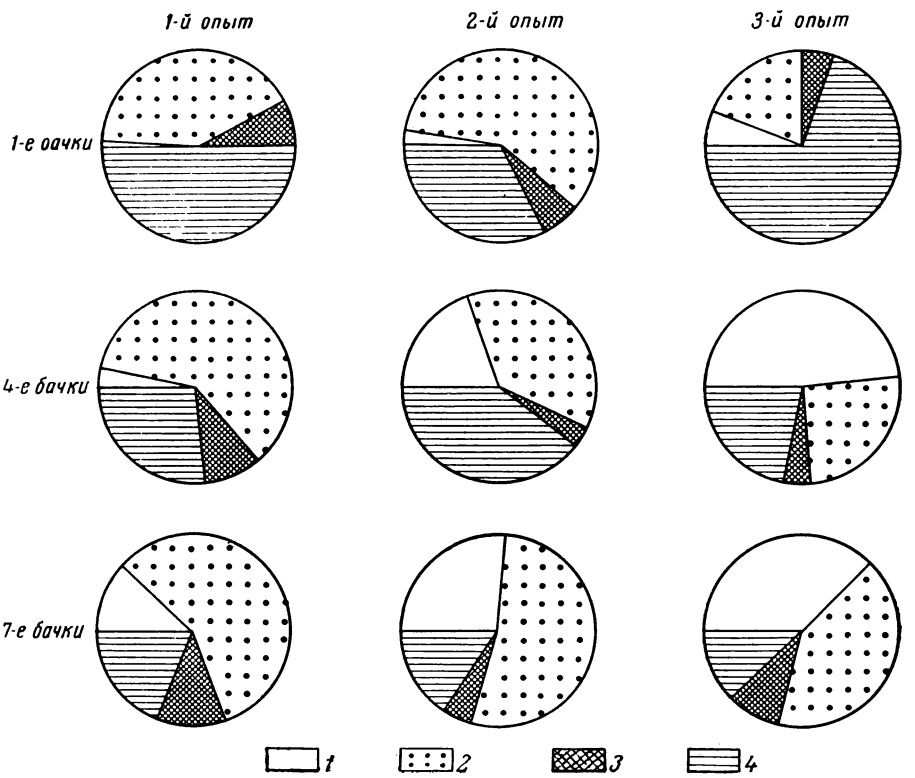


Рис. 11. Распределение радиоактивности (в % от найденной в данном бачке) по основным компонентам в опытах с раствором осколков урана

1 — вода, *2* — грунт, *3* — растения, *4* — прочая биомасса

раствора и увеличение первого и последнего бачков, сильно повысило степень дезактивации воды. Баланс радиоактивности показал, что основная масса ее поглощается биомассой. Следовательно и в этом случае биомасса, занимая по весу весьма незначительную часть, в распределении радиоактивности играет существенную роль. Распределение активности по слоям грунта в основном аналогично таковому для стронция, что, как упоминалось, объясняется присутствием значительных количеств стронция в растворе осколков урана.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Результаты всех вышеизложенных опытов можно кратко резюмировать следующим образом.

При стандартном режиме (ежесуточная подача в серию бачков 6 л раствора концентрацией 10 мккюри/л) дезактивация воды от стронция и рутения происходит неполно: в воде последнего бачка серии содержится от 4,5 до 10% стронция и от 1,5 до 2,5% рутения. От цезия и церия вода дезактивируется целиком, причем радиоактивность иногда не доходит до предпоследнего бачка. Что касается неразделенного раствора осколков урана, то его дезактивация занимает промежуточное положение:

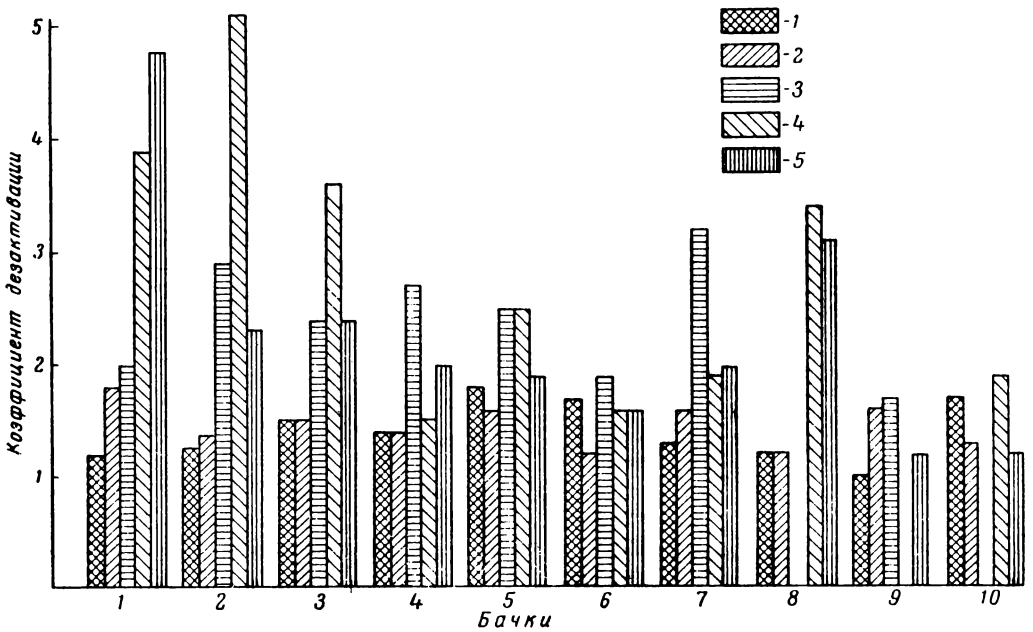


Рис. 12. Коэффициенты дезактивации бачков во всех проведенных опытах со стронцием, рутением, цезием, церием и неразделенным раствором осколков урана

1 — стронций; *2* — рутений; *3* — цезий; *4* — церий; *5* — раствор осколков урана

активность доходит до конца серии в ничтожных концентрациях. Абсолютная концентрация радиоактивности падает от бачка к бачку, но при этом интересно отметить, что, несмотря на создавшуюся благодаря этому шкалу резко снижающихся концентраций, коэффициенты дезактивации бачков для всех четырех изученных элементов (так мы обозначаем отношение концентраций активности в воде предыдущего и последующего бачков) колеблются вокруг некоторой средней величины, не обнаруживая, однако, последовательных изменений в зависимости от номера бачка. В отличие

от этого при дезактивации неразделенного раствора осколков урана наблюдается резкое падение коэффициентов дезактивации с увеличением порядкового номера бачка (рис. 12). Резкое падение коэффициентов дезактивации от первого к последующим бачкам в опытах с неразделенным раствором осколков несомненно объясняется тем, что из смеси элементов в первых бачках связываются наиболее легко сорбирующиеся и в последующие бачки поступает все менее благоприятная, с точки зрения поглощения компонентами бачков, комбинация элементов.

Распределение изученных элементов по трем основным компонентам водоема (вода, грунт и биомасса) можно разбить на три основных типа. Стронций распределяется более или менее равномерно: его содержание в воде, грунте и биомассе примерно одинаково. Церий, неразделенный раствор осколков урана и особенно рутений связываются преимущественно биомассой; при этом относительно плохая дезактивация воды от рутения объясняется сравнительно очень низким накоплением его в грунте. К третьей группе принадлежит цезий, основная масса которого поглощается грунтом. Усредненные из всех опытов данные по распределению радиоактивности между водой, грунтом и биомассой приведены в табл. 21.

Таблица 21

Процентное распределение радиоактивности по основным компонентам бачков (среднее из всех опытов)

Компоненты	Стронций	Рутений	Цезий	Церий	Раствор осколков урана
Вода	32,7	12,3	5,8	3,1	8,3
Грунт	37,8	18,2	71,3	40,4	37,2
Биомасса	29,5	69,5	22,9	56,5	54,5

Из табл. 22, где приведены средние данные из всех проведенных опытов (см. табл. 1, 5, 9, 13 и 17), видно, что по степени проникновения радиоактивности в глубину грунта резких отличий не наблюдается, за исключением более слабого проникновения в глубину грунта рутения.

Таблица 22

Распределение радиоактивности по слоям грунта (в % от его общей радиоактивности) (среднее из всех проведенных опытов)

Слои грунта	Стронций	Рутений	Цезий	Церий	Раствор осколков урана
Верхний слой песка толщиной в 1 *см*	51,3	67,5	59,0	50,2	52,6
Остаток верхнего слоя . .	35,0	21,1	29,2	33,9	33,1
Почва	10,1	4,9	5,5	9,4	10,4
Нижний слой песка	3,6	6,5	6,3	6,5	3,9

В табл. 23 приведены усредненные из всех опытов коэффициенты накопления изученных элементов в грунте, водных растениях и смеси планктона, перифитона и детрита («прочая биомасса»). Обращают на себя внимание сравнительно высокие коэффициенты накопления грунтом церия и особенно цезия; несомненно, что за счет этих элементов несколько повышен коэффициент накопления грунтом смеси осколков урана. Коэффициенты накопления активности биомассой возрастают от стронция, через рутений и цезий, к церию. Во всех случаях коэффициенты накопления активности в растениях значительно ниже, чем в прочей биомассе.

Таблица 23

Коэффициенты накопления радиоактивных элементов основными компонентами бачков (средние данные из всех опытов)

Компоненты	Стронций	Рутений	Цезий	Церий	Раствор осколков урана
Грунт	1,2	0,97	14,5	11,0	5,8
Растения	838	1190	1486	3430	1785
Прочая биомасса . .	1609	4373	9780	22 363	14 224

Приведенные в табл. 21 и 23 данные по распределению и коэффициентам накопления различных элементов хорошо согласуются и удовлетворительно объясняют различия в степени дезактивации воды, наблюдавшиеся в опытах с этими элементами. В частности, можно подметить следующие соотношения. Стронций, равномерно распределявшийся между основными компонентами, имеет самый низкий из всех изученных элементов коэффициент накопления в биомассе и довольно низкий коэффициент накопления в грунте. Однако вес грунта во столько раз выше веса биомассы, во сколько коэффициент накопления биомассы выше коэффициента накопления грунта. Рутений имеет очень низкий коэффициент накопления в грунте и довольно высокий в биомассе. Здесь отношение весов и коэффициентов накопления сдвинуто в сторону последних. Поэтому рутений может быть отнесен к группе элементов, преимущественно сорбирующихся биомассой. К числу таких элементов следует отнести и церий, имеющий сравнительно высокий коэффициент накопления в грунте, но еще более высокий коэффициент накопления в биомассе (более 20 000). Иная картина наблюдается у цезия, имеющего самый высокий коэффициент накопления в грунте и довольно высокий коэффициент накопления в биомассе. Но распределение цезия (табл. 21) показывает, что здесь главную роль играет грунт. По-видимому, в этом случае отношение весов преобладает над отношением коэффициентов накопления.

При сравнении степени дезактивации воды можно отметить следующее: стронций и рутений сравнительно плохо поглощаются грунтом и биомассой водоемов и дезактивируются не полностью. Такое поведение стронция в водоеме понятно: он является представителем щелочноземельных элементов, имеющих высокий pH гидролиза, соли его хорошо растворимы, он сравнительно плохо сорбируется на поверхностях. Поглощение его биомассой также сравнительно невелико, так как он равномерно распределяется между имеющимся в воде кальцием. Этими основными причинами и можно объяснить относительно низкую дезактивацию воды от стронция. Один из описанных выше опытов со стронцием показал, что улучшение условий сорбции (в данном случае более медленный проток) ведет к увеличению дезактивации воды от стронция.

В опытах с рутением также не удалось достигнуть полной дезактивации, хотя степень дезактивации была несколько выше, чем в опытах со стронцием. Поведение рутения пока трудно объяснимо и должно быть изучено в дальнейших специальных опытах.

Что касается цезия и церия, то эти элементы очень хорошо поглощаются грунтом и биомассой бачков, благодаря чему в соответствующих опытах была достигнута полная дезактивация. Однако в связи с различием химических свойств цезия и церия примерно одинаковая дезактивация воды в опытах достигается различными путями. Церий при нормальном pH воды особенно хорошо поглощается биомассой, давая там максимальные коэффициенты накопления. Цезий же, по-видимому, благодаря своей способности проникать в кристаллическую решетку силикатов, концентрируется

главным образом грунтом, давая в нем значительно более высокие коэффициенты накопления по сравнению с другими элементами. Поведение неразделенного раствора осколков урана зависит в основном от количественных соотношений в нем стронция, рутения, цезия и церия.

Описанные в настоящем сообщении опыты по дезактивации воды в сериях водоемов дали, несмотря на форсированный режим протока, вполне удовлетворительные результаты, хорошо согласующиеся с результатами опытов в наружных установках [1]. Они дали и частичный ответ на поставленный во введении вопрос о возможных и вероятных различиях в распределении разных элементов по основным компонентам водоема, а в связи с этим и о соответствующих различиях в коэффициентах дезактивации. Уже изучение первых четырех элементов показало, что степени или коэффициенты дезактивации отдельных элементов неодинаковы. Среди четырех изученных элементов оказались представители трех основных типов распределения активности в водоеме: равномерного (стронций), с преимущественным накоплением в грунте (цезий) и с преимущественным накоплением в биомассе (рутений и церий).

В дальнейших опытах будет постепенно накапливаться материал по различным химическим элементам, а также изучаться поведение определенных элементов при разных условиях (разное pH воды, различные грунты и мути и разные биоценозы). Эти новые материалы позволят детализировать классификацию типов распределения по компонентам и механизмы, лежащие в основе этих типов распределения.

ВЫВОДЫ

1. На основании литературных данных о концентрации рассеянных элементов живыми организмами и предварительных опытов по распределению химических элементов в аквариумах предполагается возможность биологической дезактивации воды от попадающих в нее радиоактивных изотопов.

2. Опыты проводились с четырьмя основными изотопами, входящими в состав неразделенного раствора осколков урана: стронцием-90, рутением-106, цезием-137 и церием-144, а также и с раствором осколков урана, состоящим в основном из этих же и некоторых других изотопов.

3. Методика опытов состояла в пропускании растворов изотопов через серии небольших аквариумов-бачков, содержащих грунт, водные растения и соответствующий микропланктон и перифитон.

4. Опыты со стронцием показали, что он в таких установках при ежесуточной подаче раствора в количестве 6 л с концентрацией активности в 10 мккюри/л проходит через всю серию в количестве от 4,5 до 10,8% от исходной концентрации. Уменьшение суточной подачи раствора до 3 л и увеличение размеров первого бачка обеспечивает дезактивацию воды от стронция. Изучение распределения стронция по компонентам показало, что его следует отнести к равномерно распределяющимся элементам.

5. Рутений при стандартной методике (6 л ежесуточной подачи в серию из 10 бачков) дезактивируется не полностью проходя через серию в количестве от 1,5 до 2,5% от исходной концентрации. При изучении распределения по компонентам он отнесен к группе элементов, преимущественно поглощающихся биомассой.

6. В опытах с цезием была достигнута полная дезактивация воды. Изучение распределения цезия по компонентам показало, что его следует отнести к элементам, преимущественно сорбирующимся грунтом.

[1] Е. А. Тимофеева-Ресовская и Н. В. Тимофеев-Ресовский. Распределение рассеянных элементов по компонентам водоемов. II. Почвенно-биологическая дезактивация воды в прудах-отстойниках.

7. В опытах с церием при стандартной методике также была достигнута полная дезактивация воды. Изменение методики в сторону уменьшения суточной подачи раствора и увеличение первого бачка не внесли принципиальных отличий в результаты опытов. При изучении распределения церий, как и рутений, отнесен к группе элементов, преимущественно поглощающихся биомассой.

8. В опытах с неразделенным раствором осколков урана была получена высокая степень дезактивации воды. Увеличение срока опыта обусловило снижение степени дезактивации воды. Однако изменение режима (снижение суточной подачи раствора до 3 л и увеличение объема первого и последнего бачков) обеспечило даже в длительных опытах (более полугода) высокую степень дезактивации воды.

9. Изучение накопления активности в различных компонентах показало, что наибольшими коэффициентами накопления обладают планктон, перифитон и детрит, более низким — высшие растения, и, наконец, самым низким — грунт. Из изученных элементов наиболее высокий коэффициент накопления в биомассе дает церий, а самый низкий — стронций. В грунте же самым высоким коэффициентом накопления обладает цезий, а самым низким — рутений.

10. В заключении дается общий обзор проведенных опытов и делается попытка разбить изученные элементы по распределению в различных компонентах водоемов на три основных типа: равномерно распределяющиеся (стронций), сорбирующиеся преимущественно грунтом (цезий) и поглощающиеся главным образом биомассой (рутений, церий и неразделенный раствор осколков урана).

ЛИТЕРАТУРА

Агафонов Б. М. Некоторые опыты по биологической дезактивации воды. 2. Опыты в сериях водоемо-бачков. Тезисы Всесоюзной конференции по медицинской радиологии. М., Медгиз, 1956.

Тимофеева-Ресовская Е. А. Некоторые опыты по биологической дезактивации воды. 1. Наружные опыты в прудах. Тезисы Всесоюзной конференции по медицинской радиологии. М., Медгиз, 1956.

Тимофеева-Ресовская Е. А., Тимофеев-Ресовский Н. В. Распределение рассеянных элементов по компонентам водоема. II. Почвенно-биологическая дезактивация воды в прудах-отстойниках. Статья в настоящем сборнике.

Таблица 1

Число измеренных частиц в минуту на 1 мл воды во всех бачках за все время опыта (первый опыт со стронцием)

Число, месяц (1953 г.)	Бачок									
	1-й	2-й	3-й	4-й	5-й	6-й	7-й	8-й	9-й	10-й
25/VIII	156	9	4	—	—	—	—	—	—	—
26/VIII	506	158	7	—	—	—	—	—	—	—
27/VIII	682	169	24	6	5	—	—	—	—	—
29/VIII	890	344	76	34	19	4	24	4	—	—
31/VIII	2874	1099	341	88	33	13	92	49	45	8
1/IX	2245	1205	410	115	31	—	—	101	85	83
2/IX	2476	1684	702	231	87	24	13	6	5	8
3/IX	2400	1357	805	415	211	136	15	8	3	2
4/IX	2717	1766	986	994	279	107	40	18	6	29
5/IX	3462	2072	1140	671	379	140	64	23	65	8
8/IX	1638	1269	911	547	297	136	58	14	4	18
10/IX	2094	1407	967	663	364	199	87	31	8	5
11/IX	2683	1865	1329	913	624	312	153	69	26	7
12/IX	3057	2150	1502	1037	700	433	211	95	45	16
14/IX	2310	1740	1239	916	652	404	229	126	64	26
15/IX	2643	1845	1333	1022	653	399	198	104	48	18
17/IX	2773	—	1577	1050	726	611	403	238	138	69
18/IX	3412	2457	1755	1284	1007	705	467	298	173	102
19/IX	3388	2367	1755	1338	1005	704	501	300	180	104
21/IX	3512	2541	1838	1347	915	713	505	343	154	103
23/IX	3821	2032	1577	1203	930	702	518	359	236	137
24/IX	3634	1995	1747	1244	993	797	622	583	462	336
25/IX	2944	2455	1855	1468	1141	863	695	510	363	277
26/IX	2783	2255	1724	1363	1127	853	637	506	368	277
28/IX	2584	1775	1486	1290	1076	855	740	569	435	339

Таблица 2

Число измеренных частиц в минуту на 1 мл воды во всех бачках за все время опыта (второй опыт со стронцием)

Число, месяц, год	Бачок									
	1-й	2-й	3-й	4-й	5-й	6-й	7-й	8-й	9-й	10-й
1953										
10/XI	458	47	2	—	—	—	—	—	—	—
11/XI	421	167	48	4	3	—	—	—	—	—
14/XI	390	245	102	28	8	4	—	—	—	—
17/XI	242	208	126	37	10	3	2	2	—	—
18/XI	578	308	210	114	44	15	8	7	2	—
23/XI	728	359	213	122	56	20	10	6	8	2
25/XI	1070	530	282	147	70	34	8	2	9	13
27/XI	1345	753	414	194	91	35	14	3	16	9
30/XI	1432	1022	616	314	148	42	17	8	—	—
2/XII	1478	1137	719	402	198	100	37	7	7	2

Таблица 2 (продолжение)

Число, месяц, год	Бачок									
	1-й	2-й	3-й	4-й	5-й	6-й	7-й	8-й	9-й	10-й
1953										
4/XII	1496	1206	822	500	249	130	69	26	9	7
8/XII	1415	1215	877	578	306	172	87	21	7	—
10/XII	1403	1250	909	622	354	212	91	31	10	4
15/XII	1232	1335	1139	827	454	249	118	42	18	4
17/XII	1118	1223	1162	863	558	252	127	40	11	4
19/XII	830	1240	1168	945	648	392	206	82	24	6
22/XII	1230	1088	1039	822	696	336	202	100	19	—
24/XII	1206	1165	1054	920	688	448	218	117	40	8
31/XII	2084	1402	1188	1032	862	656	466	230	112	33
1954										
3/I	2097	1345	619	897	575	376	192	78	21	—
9/I	2441	1896	1441	1082	882	681	895	310	173	52
16/I	2209	1942	1598	1246	1008	818	586	409	214	137
23/I	2431	2090	1904	1603	1321	1036	787	577	376	196
30/I	2275	1744	1032	1463	1301	1128	896	714	456	235
6/II	1831	1788	1600	1458	1242	1056	847	668	435	243
15/II	2298	1842	1749	1642	1398	1054	858	648	428	290

Таблица 3

Число измеренных частиц в минуту на 1 мл воды во всех бачках за все время опыта (третий опыт со стронцием)

Число, месяц (1954 г.)	Бачок								
	1-й	2-й	3-й	4-й	5-й	6-й	7-й	8-й	9-й
19/VII	—	—	—	—	—	—	—	—	—
20/VII	—	—	—	—	—	—	—	—	—
21/VII	—	—	—	—	—	—	—	—	—
22/VII	—	—	—	—	—	—	—	—	—
23/VII	231	41	11	7	—	—	—	—	—
26/VII	311	44	6	5	—	—	—	—	—
27/VII	392	47	6	3	—	—	—	—	—
28/VII	376	64	12	1	—	—	—	—	—
2/VIII	360	81	19	—	—	—	—	—	—
4/VIII	231	112	34	21	—	—	—	—	—
7/VIII	325	117	20	3	10	—	—	—	—
10/VIII	401	221	84	12	4	4	4	2	2
13/VIII	555	402	87	39	12	9	—	—	—
17/VIII	918	565	249	109	33	44	39	—	—
26/VIII	1388	615	218	76	23	4	—	—	—
1/IX	985	591	308	142	32	10	3	—	—
8/IX	858	351	345	45	25	50	43	—	—
13/IX	972	600	344	82	28	38	31	31	—
15/IX	1087	950	343	120	32	27	39	26	—
21/IX	1385	1320	582	223	85	40	32	32	—
29/IX	1027	980	475	378	119	43	30	25	—

Таблица 4

Общий вес (в г) и общая активность (в имп/мин) компонентов бачков в опытах со стронцием

№ бачка	Компоненты							
	вода		грунт		растения		прочая биомасса	
	вес	радиоактивность	вес	радиоактивность	вес	радиоактивность	вес	радиоактивность
Первый опыт								
1-й	20 200	$16{,}0\cdot10^6$	36 216	$12{,}8\cdot10^6$	11,0	$8{,}7\cdot10^6$	7,0	$21{,}6\cdot10^6$
2-й	15 900	$1{,}2\cdot10^6$	39 390	$14{,}7\cdot10^6$	10,0	$7{,}6\cdot10^6$	4,0	$8{,}2\cdot10^6$
3-й	16 200	$7{,}7\cdot10^6$	35 387	$7{,}4\cdot10^6$	10,0	$5{,}4\cdot10^6$	3,0	$3{,}4\cdot10^6$
4-й	16 000	$5{,}5\cdot10^6$	35 387	$4{,}7\cdot10^6$	8,0	$5{,}4\cdot10^6$	3,0	$2{,}0\cdot10^6$
5-й	15 400	$6{,}0\cdot10^6$	35 190	$4{,}4\cdot10^6$	8,0	$3{,}1\cdot10^6$	4,0	$1{,}5\cdot10^6$
6-й	19 050	$6{,}2\cdot10^6$	35 034	$2{,}9\cdot10^6$	9,0	$2{,}7\cdot10^6$	2,0	$1{,}2\cdot10^6$
7-й	15 250	$2{,}6\cdot10^6$	34 157	$1{,}7\cdot10^6$	8,0	$1{,}8\cdot10^6$	2,0	$0{,}9\cdot10^6$
8-й	24 400	$4{,}0\cdot10^6$	34 902	$2{,}6\cdot10^6$	10,0	$1{,}7\cdot10^6$	4,0	$0{,}8\cdot10^6$
9-й	25 590	$3{,}1\cdot10^6$	35 823	$2{,}9\cdot10^6$	8,0	$1{,}0\cdot10^6$	3,0	$0{,}5\cdot10^6$
10-й	20 400	$2{,}1\cdot10^6$	35 013	$0{,}6\cdot10^6$	8,0	$0{,}8\cdot10^6$	3,0	$0{,}3\cdot10^6$
Второй опыт								
1-й	27 000	$59{,}0\cdot10^6$	32 200	$136{,}0\cdot10^6$	2,02	$0{,}51\cdot10^6$	29,89	$61{,}0\cdot10^6$
5-й	28 600	$35{,}0\cdot10^6$	31 550	$67{,}0\cdot10^6$	3,93	$4{,}00\cdot10^6$	37,30	$35{,}0\cdot10^6$
10-й	32 500	$6{,}6\cdot10^6$	33 800	$15{,}1\cdot10^6$	5,55	$0{,}50\cdot10^6$	23,60	$5{,}0\cdot10^6$
Третий опыт								
1-й	51 500	$62{,}0\cdot10^6$	17 530	$84{,}0\cdot10^6$	41,87	$2{,}0\cdot10^6$	19,34	$29{,}0\cdot10^6$
3-й	31 500	$16{,}6\cdot10^6$	6 720	$11{,}8\cdot10^6$	33,97	$2{,}5\cdot10^6$	6,50	$1{,}9\cdot10^6$
5-й	26 500	$2{,}7\cdot10^6$	8 350	$2{,}2\cdot10^6$	30,13	$0{,}9\cdot10^6$	23,30	$2{,}4\cdot10^6$
10-й	29 000	0	8 142	$0{,}3\cdot10^6$	27,12	$0{,}1\cdot10^6$	23,51	$0{,}2\cdot10^6$

Таблица 5

Число измеренных частиц в минуту на 1 мл воды во всех бачках за все время опыта (первый опыт с рутением)

Число, месяц (1953 г.)	Бачок									
	1-й	2-й	3-й	4-й	5-й	6-й	7-й	8-й	9-й	10-й
29/VIII	333	33	29	11	—	—	—	—	—	—
31/VIII	1552	294	21	—	—	—	—	—	—	—
1/IX	1443	228	27	14	8	—	—	—	—	—
2/IX	1591	421	97	8	—	—	—	—	—	—
3/IX	1559	562	228	81	27	7	4	—	—	—
4/IX	2138	974	474	159	94	96	—	—	—	—
5/IX	2013	883	449	129	78	23	3	—	—	—
8/IX	1218	688	392	174	63	35	4	2	—	—
10/IX	939	692	452	225	113	37	10	3	—	—
11/IX	1363	672	461	258	146	77	39	16	8	1
12/IX	1275	645	463	291	159	85	41	16	11	9
14/IX	1085	598	402	253	164	116	58	27	11	4

Таблица 5 (продолжение)

Число, месяц (1953 г.)	Бачок									
	1-й	2-й	3-й	4-й	5-й	6-й	7-й	8-й	9-й	10-й
15/IX	1338	640	489	263	173	115	58	20	17	5
17/IX	1191	623	430	235	163	99	78	64	27	15
18/IX	1502	796	531	340	224	167	95	55	33	19
19/IX	1521	830	533	337	212	143	103	76	36	26
21/IX	2213	1136	803	436	285	198	129	80	45	33
23/IX	2382	1223	881	536	271	261	198	128	77	53
24/IX	2638	1372	1061	614	459	325	254	176	119	82
25/IX	2995	1580	1072	627	451	308	227	361	120	94
26/IX	2842	1449	429	577	413	306	236	140	86	92
28/IX	1216	1853	1203	758	553	379	268	256	181	115
29/IX	—	—	1099	703	471	289	228	206	173	152
1/X	1724	1057	689	846	604	423	279	254	189	158

Таблица 6

Число измеренных частиц в минуту на 1 мл воды во всех бачках за все время опыта (второй опыт с рутением)

Число, месяц, год	Бачок									
	1-й	2-й	3-й	4-й	5-й	6-й	7-й	8-й	9-й	10-й
1953										
25/XI	700	159	30	3	—	—	—	—	—	—
30/XI	516	110	47	16	6	6	—	—	—	—
1/XII	808	331	69	20	6	1	—	—	—	—
3/XII	1025	294	79	27	12	6	3	1	—	—
7/XII	946	367	85	43	21	5	2	—	2	—
9/XII	871	348	100	50	24	24	10	5	3	2
15/XII	1070	407	135	63	26	12	5	2	—	—
17/XII	1431	587	146	64	30	17	5	—	—	—
19/XII	1674	799	189	86	36	20	6	4	—	—
22/XII	1678	807	284	125	55	23	15	3	—	—
24/XII	1570	860	429	70	33	13	6	6	6	1
29/XII	2655	885	315	184	77	39	10	5	2	—
31/XII	2395	1514	451	213	113	64	28	12	—	—
1954										
3/I	2843	1240	415	245	123	77	53	47	13	25
5/I	4075	1851	598	262	128	75	27	12	—	—
7/I	4807	2488	781	383	156	100	49	22	5	3
9/I	5128	2791	1006	472	192	104	66	25	15	5
14 I	5531	2966	1178	528	261	147	74	42	18	5
21/I	3481	2380	1122	551	303	174	112	63	21	13
28/I	3677	2500	1285	746	352	185	126	86	57	24
4/II	2638	1695	746	561	293	172	115	72	40	21
11/II	2596	1896	1057	698	504	372	293	147	87	51
18/II	—	4991	3269	773	735	1219	407	547	305	187
25/II	4376	2786	1467	1062	647	415	287	202	220	148
5/III	3666	2302	1297	926	569	456	296	238	148	85

Таблица 7

Общий вес (в г) и общая активность (в имп/мин) компонентов бачков в опытах с рутением

Бачок	Компоненты							
	вода		грунт		растения		прочая биомасса	
	вес	радиоактивность	вес	радиоактивность	вес	радиоактивность	вес	радиоактивность
				Первый опыт				
1-й	15 400	$12,6 \cdot 10^6$	32 610	$29,7 \cdot 10^6$	6,0	$11,3 \cdot 10^6$	7,0	$52,4 \cdot 10^6$
2-й	19 000	$8,5 \cdot 10^6$	33 830	$12,3 \cdot 10^6$	7,0	$5,2 \cdot 10^6$	7,0	$19,3 \cdot 10^6$
3-й	15 400	$4,1 \cdot 10^6$	9 420	$5,0 \cdot 10^6$	7,0	$2,1 \cdot 10^6$	6,0	$8,9 \cdot 10^6$
4-й	17 300	$3,6 \cdot 10^6$	8 750	$1,7 \cdot 10^6$	8,0	$2,0 \cdot 10^6$	7,0	$5,5 \cdot 10^6$
5-й	15 600	$2,3 \cdot 10^6$	3 220	$1,4 \cdot 10^6$	9,0	$1,9 \cdot 10^6$	5,0	$3,2 \cdot 10^6$
6-й	18 200	$2,3 \cdot 10^6$	9 720	$1,1 \cdot 10^6$	8,0	$0,7 \cdot 10^6$	5,0	$1,7 \cdot 10^6$
7-й	17 000	$1,8 \cdot 10^6$	9 560	$0,7 \cdot 10^6$	9,0	$0,7 \cdot 10^6$	3,0	$1,9 \cdot 10^6$
8-й	18 600	$1,7 \cdot 10^6$	33 760	$1,0 \cdot 10^6$	10,0	$0,5 \cdot 10^6$	4,0	$0,7 \cdot 10^6$
9-й	18 600	$1,4 \cdot 10^6$	33 190	$1,4 \cdot 10^6$	10,0	$0,3 \cdot 10^6$	4,0	$0,4 \cdot 10^6$
10-й	19 500	$1,3 \cdot 10^6$	32 910	$0,7 \cdot 10^6$	9,0	$0,2 \cdot 10^6$	7,0	$0,4 \cdot 10^6$
				Второй опыт				
1-й	20 100	$46,0 \cdot 10^6$	29 775	$66,0 \cdot 10^6$	3,71	$31,0 \cdot 10^6$	26,46	$304,0 \cdot 10^6$
5-й	20 800	$9,3 \cdot 10^6$	27 725	$22,6 \cdot 10^6$	4,27	$1,5 \cdot 10^6$	23,83	$95,9 \cdot 10^6$
10-й	18 700	$2,9 \cdot 10^6$	26 975	$0,8 \cdot 10^6$	3,83	$0,4 \cdot 10^6$	26,35	$0,2 \cdot 10^6$

Таблица 8

Число измеренных частиц в минуту на 1 мл воды во всех бачках за все время опыта (первый опыт с цезием)

Число, месяц (1953 г.)	Бачок									
	1-й	2-й	3-й	4-й	5-й	6-й	7-й	8-й	9-й	10-й
4/IX	295	21	1	—	—	—	—	—	—	—
7/IX	728	158	20	—	—	—	—	—	—	—
8/IX	503	111	7	7	—	—	—	—	—	—
9/IX	617	106	19	5	5	—	—	—	—	—
10/IX	1221	170	50	2	—	—	—	—	—	—
11/IX	923	133	30	4	2	—	—	—	—	—
12/IX	1286	400	83	6	—	—	—	—	—	—
14/IX	717	170	43	10	7	—	—	—	—	—
15/IX	881	121	55	2	—	—	—	—	—	—
17/IX	982	309	45	14	4	3	—	—	—	—
18/IX	1129	241	86	21	3	—	—	—	—	—
19/IX	1388	350	119	25	8	8	—	—	—	—
21/IX	1352	363	131	29	6	—	—	—	—	—
22/IX	968	332	101	26	3	—	—	—	—	—
24/IX	1336	703	205	70	15	1	—	—	—	—
25/IX	1396	654	248	65	12	4	1	—	—	—
26/IX	1206	458	633	38	9	—	—	—	—	—
28/IX	1350	626	273	105	30	9	1	—	—	—
29/IX	1542	750	272	124	24	9	—	—	—	—
1/X	1787	—	780	355	119	22	—	—	—	—
2/X	1915	750	683	107	61	15	16	—	—	—
6/X	1292	731	438	217	105	52	23	16	9	—
7/X	1226	682	344	157	41	22	2	—	—	—

Таблица 9

Число измеренных частиц в минуту на 1 мл воды во всех бачках в течение всего опыта (второй опыт с цезием)

Число, месяц, год	Бачок									
	1-й	2-й	3-й	4-й	5-й	6-й	7-й	8-й	9-й	10-й
1953										
27/XI	91	2	—	—	—	—	—	—	—	—
30/XI	71	17	2	—	—	—	—	—	—	—
2/XII	203	27	—	—	—	—	—	—	—	—
4/XII	156	17	—	—	—	—	—	—	—	—
7/XII	168	27	—	—	—	—	—	—	—	—
9/XII	121	18	—	—	—	—	—	—	—	—
11/XII	269	52	13	—	—	—	—	—	—	—
15/XII	250	52	16	—	—	—	—	—	—	—
17/XII	276	76	9	—	—	—	—	—	—	—
21/XII	151	46	30	—	—	—	—	—	—	—
26/XII	264	77	14	—	—	—	—	—	—	—
29/XII	324	56	10	—	—	—	—	—	—	—
31/XII	388	94	20	—	—	—	—	—	—	—
1954										
4/I	346	88	15	—	—	—	—	—	—	—
7/I	492	145	34	—	—	—	—	—	—	—
9/I	603	185	49	12	6	—	—	—	—	—
12/I	451	152	28	—	—	—	—	—	—	—
14/I	653	203	53	—	—	—	—	—	—	—
22/I	601	239	52	23	—	—	—	—	—	—
29/I	565	183	27	15	—	—	—	—	—	—
5/II	619	137	23	—	—	—	—	—	—	—
18/II	821	218	51	51	—	—	—	—	—	—
19/II	832	181	50	—	—	—	—	—	—	—
27/II	917	278	86	15	16	—	—	—	—	—
5/II	756	180	81	11	8	—	—	—	—	—

Таблица 10

Общий вес (в г) и общая активность (в имп/мин) компонентов бачков в опытах с цезием

Бачок	Компоненты							
	вода		грунт		растения		прочая биомасса	
	вес	радиоактивность	вес	радиоактивность	вес	радиоактивность	вес	радиоактивность
				Первый опыт				
1-й	17 700	$47{,}8 \cdot 10^5$	30 372	$492{,}0 \cdot 10^5$	12,0	$31{,}4 \cdot 10^5$	15,0	$273{,}1 \cdot 10^5$
2-й	19 000	$16{,}7 \cdot 10^5$	32 407	$298{,}0 \cdot 10^5$	9,0	$11{,}1 \cdot 10^5$	10,0	$116{,}1 \cdot 10^5$
3-й	15 300	$8{,}5 \cdot 10^5$	9 379	$99{,}5 \cdot 10^5$	10,0	$8{,}8 \cdot 10^5$	8,0	$54{,}6 \cdot 10^5$
4-й	20 600	$2{,}5 \cdot 10^5$	9 015	$35{,}1 \cdot 10^5$	11,0	$3{,}3 \cdot 10^5$	6,0	$20{,}1 \cdot 10^5$
5 й	17 700	$2{,}3 \cdot 10^5$	1 011	$4{,}8 \cdot 10^5$	11,0	$1{,}8 \cdot 10^5$	8,0	$11{,}4 \cdot 10^5$
6-й	29 100	$1{,}8 \cdot 10^5$	31 089	$10{,}1 \cdot 10^5$	10,0	$0{,}8 \cdot 10^5$	12,0	$8{,}1 \cdot 10^5$
7-й	20 600	0	16 362	$2{,}9 \cdot 10^5$	8,0	$0{,}4 \cdot 10^5$	9,0	$3{,}5 \cdot 10^5$
8-й	27 000	$1{,}3 \cdot 10^5$	17 663	$4{,}8 \cdot 10^5$	8,0	$0{,}1 \cdot 10^5$	8,0	$1{,}4 \cdot 10^5$
9-й	19 500	$1{,}2 \cdot 10^5$	30 651	$8{,}9 \cdot 10^5$	8,0	$0{,}1 \cdot 10^5$	6,0	$1{,}4 \cdot 10^5$
10-й	10 000	$0{,}3 \cdot 10^5$	31 190	$6{,}7 \cdot 10^5$	10,0	$0{,}1 \cdot 10^5$	10,0	$0{,}5 \cdot 10^5$
				Второй опыт				
1-й	20 600	$190{,}0 \cdot 10^5$	26 050	$2300{,}0 \cdot 10^5$	21,3	$250{,}0 \cdot 10^5$	62,2	$280{,}0 \cdot 10^5$
5-й	20 000	$3{,}6 \cdot 10^5$	26 550	$115{,}0 \cdot 10^5$	26,0	$2{,}8 \cdot 10^5$	32,3	$3{,}9 \cdot 10^5$

Таблица 11

Число измеренных частиц в минуту на 1 мл воды во всех бачках за все время опыта (первый опыт с церием)

Число, месяц, (1953 г.)	Бачок									
	1-й	2-й	3-й	4-й	5-й	6-й	7-й	8-й	9-й	10-й
4/IX	836	93	13	3	—	—	—	—	—	—
7/IX	1985	347	74	5	—	—	—	—	—	—
8/IX	1711	528	165	41	12	9	9	—	—	—
9/IX	1840	520	183	46	—	—	—	—	—	—
10/IX	1976	628	248	94	30	—	—	—	—	—
11/IX	1680	682	271	110	35	12	—	—	—	—
12/IX	1624	570	247	99	33	17	22	2	—	—
14/IX	970	302	142	77	69	22	—	2	—	—
15/IX	1481	334	125	78	71	35	4	—	—	—
17/IX	1778	424	155	88	56	19	26	14	—	—
18/IX	1984	621	282	103	63	42	22	4	2	1
19/IX	1686	568	222	82	53	24	10	—	—	—
21/IX	2198	838	357	147	64	35	15	—	—	—
22/IX	2021	761	415	212	121	63	39	11	—	—
24/IX	2068	946	535	293	176	113	58	35	17	—
25/IX	3064	1053	574	354	196	111	68	38	25	—
26/IX	3070	562	378	233	152	100	58	44	34	27
28/IX	3010	1260	623	400	199	143	88	57	44	27
29/IX	1755	769	317	240	167	185	65	49	36	24
2/X	3348	1101	526	292	190	112	85	49	42	22
7/X	4064	1050	501	239	191	107	77	56	23	23

Таблица 12

Число измеренных частиц в минуту на 1 мл воды во всех бачках в течение всего опыта (второй опыт с церием)

Число, месяц, год	Бачок									
	1-й	2-й	3-й	4-й	5-й	6-й	7-й	8-й	9-й	10-й
1953										
14/XII	230	159	2	1	—	—	—	—	—	—
16/XII	859	364	46	17	1	—	—	—	—	—
18/XII	1027	427	80	15	—	—	—	—	—	—
21/XII	1202	346	105	28	6	2	—	—	—	—
23/XII	829	594	90	21	6	—	—	—	—	—
25/XII	1307	712	212	118	7	—	—	—	—	—
28/XII	1170	572	158	68	20	3	—	—	—	—
30/XII	1566	544	181	76	42	1	—	—	—	—
1954										
4/I	1662	721	181	46	7	—	—	—	—	—
6/I	1834	846	285	79	18	2	—	—	—	—
8/I	1672	809	273	77	22	6	—	—	—	—
11/I	2233	1281	438	145	51	19	8	5	5	
13/I	2017	1606	423	166	58	20	10	3	—	—

Таблица 12 (продолжение)

Число, месяц, го д	Бачок									
	1-й	2-й	3-й	4- й	5-й	6-й	7- й	8-й	9-й	10- й
1954										
15/I	1609	1310	432	218	117	52	9	—	—	—
18/I	1433	966	339	184	86	35	27	—	—	—
20/I	1302	738	329	159	82	25	10	4	2	1
24/I	1504	1265	555	196	91	33	18	9	6	2
25/I	1396	884	428	244	113	57	25	10	—	—
1/II	2158	1440	297	124	76	44	30	5	—	—
8/II	1589	1166	386	258	99	63	52	3	3	1
16/II	1119	693	267	305	34	13	6	6	5	21
23/II	1095	1104	272	145	54	27	12	5	—	—
2/III	1145	698	237	135	35	14	7	2	10	20
12/III	1232	779	222	133	47	19	11	5	2	1

Таблица 13

Число измеренных частиц в минуту на 1 мл воды во всех бачках за все время опыта (третий опыт с церием)

Число, месяц, (1954 г.)	Бачок									
	1-й	2-й	3-й	4-й	5-й	6-й	7-й	8-й	9-й	10-й
20/VII	216	9	—	—	—	—	—	—	—	—
21/VII	285	38	4	—	—	—	—	—	—	—
22/VII	355	120	66	2	1	—	—	—	—	—
23/VII	159	33	12	—	—	—	—	—	—	—
26/VII	148	65	15	15	16	—	—	—	—	—
29/VII	194	33	21	1	—	—	—	—	—	—
4/VIII	294	102	18	14	4	8	14	—	—	—
6/VIII	295	61	16	16	3	—	—	—	—	—
10/VIII	125	24	3	1	—	—	—	—	—	—
13/VIII	230	74	7	6	11	3	—	—	—	—
17/VIII	270	24	2	4	—	—	—	—	—	—
21/VIII	167	52	29	4	—	—	—	—	—	—
24/VIII	430	100	25	5	2	1	—	—	—	—
27/VIII	468	54	10	5	2	1	—	—	—	—
1/IX		11	1	3	—	—	—	—	—	—
7/IX	211	25	15	4	1	6	—	—	—	—
15/IX	585	128	15	3	—	—	—	—	—	—
21/IX	2113	129	13	2	1	—	—	—	—	—
29/IX	1337	145	28	24	17	15	—	—	—	—

Таблица 14

Общий вес (в г) и общая активность (в имп/мин) компонентов бачков в опытах с церием

Бачок	Компоненты							
	вода		грунт		растения		прочая биомасса	
	вес	радиоактивность	вес	радиоактивность	вес	радиоактивность	вес	радиоактивность
				Первый опыт				
1-й	16 200	$6{,}7\cdot10^6$	31 775	$48{,}6\cdot10^6$	13,0	$17{,}5\cdot10^6$	6,0	$68{,}2\cdot10^6$
2-й	18 500	$2{,}1\cdot10^6$	16 545	$15{,}0\cdot10^6$	10,0	$7{,}0\cdot10^6$	7,0	$20{,}9\cdot10^6$
3-й	15 200	$1{,}2\cdot10^6$	31 245	$7{,}2\cdot10^6$	8,0	$2{,}5\cdot10^6$	3,0	$4{,}7\cdot10^6$
4-й	17 800	$0{,}7\cdot10^6$	31 628	$4{,}4\cdot10^6$	11,0	$1{,}4\cdot10^6$	4,0	$3{,}1\cdot10^6$
5-й	18 000	$0{,}3\cdot10^6$	2 131	$0{,}4\cdot10^6$	10,0	$0{,}7\cdot10^6$	5,0	$1{,}7\cdot10^6$
6-й	19 300	$0{,}2\cdot10^6$	9 354	$0{,}5\cdot10^6$	13,0	$0{,}3\cdot10^6$	4,0	$1{,}0\cdot10^6$
7-й	19 500	$0{,}1\cdot10^6$	17 624	$1{,}3\cdot10^6$	13,0	$0{,}3\cdot10^6$	4,0	$0{,}6\cdot10^6$
8-й	19 600	$0{,}1\cdot10^6$	1 950	$0{,}2\cdot10^6$	12,0	$0{,}2\cdot10^6$	3,0	$0{,}5\cdot10^6$
9-й	18 400	$0{,}3\cdot10^6$	30 759	$0{,}8\cdot10^6$	12,0	$0{,}1\cdot10^6$	3,0	$0{,}3\cdot10^6$
10-й	18 500	$0{,}1\cdot10^6$	8 474	$0{,}2\cdot10^6$	12,0	$0{,}1\cdot10^6$	4,0	$0{,}3\cdot10^6$
				Второй опыт				
1-й	21 460	$7{,}6\cdot10^6$	21 150	$217{,}0\cdot10^6$	5,07	$40{,}9\cdot10^6$	23,66	$183{,}9\cdot10^6$
5-й	25 140	$0{,}5\cdot10^6$	34 000	$2{,}8\cdot10^6$	3,94	$0{,}8\cdot10^6$	2,35	$5{,}1\cdot10^6$
10-й	21 300	$0{,}1\cdot10^6$	32 600	$0{,}5\cdot10^6$	3,07	$0{,}02\cdot10^5$	57,8	$0{,}5\cdot10^5$
				Третий опыт				
1-й	50 500	$17{,}0\cdot10^6$	9 856	$190{,}0\cdot10^6$	37,89	$81{,}0\cdot10^6$	101,24	$240{,}0\cdot10^6$
3-й	30 000	$10{,}2\cdot10^5$	7 972	$7{,}5\cdot10^5$	28,72	$15{,}6\cdot10^5$	35,90	$14{,}6\cdot10^5$
9-й	31 000	$4{,}8\cdot10^4$	7 895	$57{,}6\cdot10^4$	31,52	$2{,}7\cdot10^4$	32,32	$5{,}3\cdot10^4$

Таблица 15

Число измеренных частиц в минуту на 1 мл воды во всех бачках за все время опыта (первый опыт с раствором осколков урана)

Число, месяц, (1953 г.)	Бачок									
	1-й	2-й	3-й	4-й	5-й	6-й	7-й	8-й	9-й	10-й
2/VIII	193	6	—	—	—	—	—	—	—	—
3/VIII	581	74	—	—	—	—	—	—	—	—
4/VIII	724	255	61	14	—	—	—	—	—	—
6/VIII	506	208	24	28	10	—	—	—	—	—
8/VIII	651	219	91	26	13	—	—	—	—	—
9/VIII	763	276	104	37	5	—	—	—	—	—
10/VIII	579	285	116	40	7	—	—	—	—	—
11/VIII	424	218	118	143	11	—	—	—	—	—
13/VIII	560	262	174	49	73	12	—	—	—	—
15/VIII	441	220	128	47	40	—	—	—	—	—
16/VIII	560	219	160	63	19	5	—	—	—	—
17/VIII	506	240	132	61	19	2	4	—	—	—
18/VIII	288	175	103	65	18	—	—	—	—	—

Таблица 15 (продолжение)

Число, месяц (1953 г.)	Бачок									
	1-й	2-й	3-й	4-й	5-й	6-й	7-й	8-й	9-й	10-й
20/VIII	301	143	110	87	38	14	11	2	—	—
21/VIII	383	120	97	59	40	23	12	—	—	—
22/VIII	349	158	79	52	33	12	6	—	—	—
23/VIII	426	159	96	48	28	20	4	3	—	—
24/VIII	385	177	149	45	19	21	13	1	—	—
25/VIII	350	193	100	71	29	16	6	—	—	—
27/VIII	380	170	91	48	23	15	5	—	—	—
28/VIII	342	162	94	48	24	15	3	—	—	—
29/VIII	378	188	87	47	28	15	6	—	—	—
30/VIII	402	183	91	50	24	18	6	3	—	—
31/VIII	405	149	87	48	28	13	14	5	—	—
1/IX	360	182	86	47	24	16	17	—	—	—

Таблица 16

Число измеренных частиц в минуту на 1 мл воды во всех бачках за все время опыта (второй опыт с раствором осколков урана)

Число, месяц, год	Бачок									
	1-й	2-й	3-й	4-й	5-й	6-й	7-й	8-й	9-й	10-й
1953										
22/XI	580	51	4	—	—	—	—	—	—	—
23/XI	670	172	26	7	3	—	—	—	—	—
24/XI	605	177	47	12	1	—	—	—	—	—
25/XI	600	228	79	22	4	—	—	—	—	—
27/XI	390	143	68	29	15	—	—	—	—	—
29/XI	573	188	63	36	15	—	—	—	—	—
2/XII	557	198	85	57	25	4	6	—	—	—
4/XII	649	209	101	54	31	15	10	9	11	—
6/XII	533	267	112	64	30	16	9	8	4	2
9/XII	538	240	108	61	29	12	—	—	—	—
14/XII	487	229	113	61	45	25	23	9	14	11
16/XII	367	249	126	80	43	17	17	17	4	1
20/XII	623	292	190	109	60	27	14	17	2	—
23/XII	619	312	201	123	75	—	—	—	—	—
26/XII	911	443	158	169	103	87	—	—	—	—
29/XII	785	465	240	178	120	76	43	28	14	—
31/XII	731	400	261	183	128	66	30	30	15	16
1954										
1/I	224	137	101	92	71	36	19	7	6	9
6/I	453	285	204	189	161	67	52	26	12	5
13/I	1017	466	205	161	153	125	104	69	41	25
20/I	1040	588	368	315	245	201	167	132	99	69
27/I	779	438	388	315	267	224	376	143	113	92
3/II	1094	480	325	290	244	107	176	132	114	86
9/II	914	498	235	186	198	177	159	129	107	90
16/II	1135	683	315	215	179	151	122	96	76	66

Таблица 17

Число измеренных частиц в минуту на 1 мл воды во всех бачках за все время опыта (третий опыт с раствором осколков урана)

Число, месяц (1954 г.)	Бачок								
	1-й	2-й	3-й	4-й	5-й	6-й	7-й	8-й	9-й
28/VI	81	6	—	—	—	—	—	—	—
29/VI	110	39	—	—	—	—	—	—	—
30/VI	112	9	—	—	—	—	—	—	—
1/VII	98	6	—	—	—	—	—	—	—
2/VII	97	6	—	—	—	—	—	—	—
3/VII	61	6	—	—	—	—	—	—	—
5/VII	80	2	—	—	—	—	—	—	—
6/VII	112	9	—	—	—	—	—	—	—
8/VII	128	18	—	—	—	—	—	—	—
9/VII	134	14	3	—	—	—	—	—	—
14/VII	122	13	—	—	—	—	—	—	—
15/VII	143	18	2	2	—	—	—	—	—
17/VII	195	18	5	5	4	—	—	—	—
19/VII	174	30	12	7	6	—	—	—	—
20/VII	208	23	5	2	—	1	—	—	—
24/VII	269	33	6	—	—	—	—	—	—
27/VII	192	27	10	3	—	—	—	—	—
2/VIII	124	26	5	1	5	3	—	—	—
10/VIII	130	30	4	7	—	—	—	—	—
13/VIII	68	26	6	1	—	—	—	—	—
18/VIII	77	37	5	2	—	—	—	—	—
27/VIII	166	37	7	4	—	—	—	—	—
7/IX	389	88	34	3	2	5	—	—	—
14/IX	344	116	82	5	—	—	—	—	—
20/IX	918	250	63	9	2	1	—	—	—
28/IX	1158	326	104	24	8	3	—	—	—
4/X	926	653	205	46	9	1	—	—	—
13/X	1385	804	304	88	19	2	1	1	—
19/X	583	576	321	108	28	12	6	2	—
26/X	966	778	416	164	38	8	1	—	—
10/XI	913	816	492	222	53	18	4	1	—
12/XI	830	763	487	242	76	13	5	—	—
18/XI	890	909	617	367	144	49	8	1	—
25/XI	491	535	505	271	115	37	8	2	—
2/XII	463	544	498	316	149	66	18	3	—
9/XII	550	694	625	419	230	86	25	6	—
28/XII	542	623	628	470	297	139	43	2	—
1955									
4/I	465	590	572	470	305	104	32	5	—

Таблица 18

Общий вес (в г) и общая активность (в имп/мин) компонентов бачков в опытах с раствором осколков урана

Бачок	Компоненты							
	вода		грунт		растения		прочая биомасса	
	вес	радиоактивность	вес	радиоактивность	вес	радиоактивность	вес	радиоактивность
Первый опыт								
1-й	17 800	$1{,}6\cdot10^6$	23 700	$84{,}2\cdot10^6$	17,0	$15{,}1\cdot10^6$	10,0	$103{,}6\cdot10^6$
2-й	16 500	$1{,}0\cdot10^6$	24 800	$12{,}6\cdot10^6$	10,0	$3{,}3\cdot10^6$	3,0	$12{,}8\cdot10^6$
3-й	17 300	$0{,}8\cdot10^6$	24 900	$15{,}8\cdot10^6$	10,0	$1{,}3\cdot10^6$	5,0	$5{,}8\cdot10^6$
4-й	15 800	$0{,}3.10^6$	24 700	$5{,}3\cdot10^6$	17,0	$0{,}8\cdot10^6$	6,0	$2{,}2\cdot10^6$
5-й	17 400	$0{,}4\cdot10^6$	24 500	$3{,}9\cdot10^6$	17,0	$0{,}5\cdot10^6$	6,0	$1{,}2\cdot10^6$
6-й	17 800	$0{,}1\cdot10^6$	24 800	$2{,}3\cdot10^6$	18,0	$0{,}1\cdot10^6$	5,0	$0{,}5\cdot10^6$
7-й	17 100	$0{,}1\cdot10^6$	17 200	$0{,}5\cdot10^6$	17,0	$0{,}1\cdot10^6$	7,0	$0{,}15\cdot10^6$
8-й	18 100	$0{,}2\cdot10^6$	23 050	$2{,}4\cdot10^6$	16,0	$0{,}02\cdot10^6$	5,0	$0{,}02\cdot10^6$
Второй опыт								
1-й	23 300	$8{,}0\cdot10^6$	30 550	$180{,}0\cdot10^6$	8,77	$18{,}0\cdot10^6$	19,25	$100{,}0\cdot10^6$
4-й	23 000	$3{,}0\cdot10^6$	10 075	$5{,}5\cdot10^6$	1,95	$0{,}4\cdot10^6$	21,37	$6{,}1\cdot10^6$
7-й	27 700	$2{,}6\cdot10^6$	31 170	$5{,}5\cdot10^6$	8,29	$0{,}5\cdot10^6$	16,35	$1{,}5\cdot10^6$
10-й	23 850	$1{,}4\cdot10^6$	1 225	$0{,}3\cdot10^6$	3,98	$0{,}004\cdot10^6$	20,72	$0{,}8\cdot10^6$
Третий опыт								
1-й	43 780	$20{,}0\cdot10^6$	23 950	$88{,}0\cdot10^6$	43,3	$23{,}0\cdot10^6$	246,63	$339{,}0\cdot10^6$
2-й	43 800	$26{,}0\cdot10^6$	26 200	$30{,}0\cdot10^6$	21,70	$3{,}0\cdot10^6$	160,24	$11{,}0\cdot10^6$
3-й	24 950	$14{,}0\cdot10^6$	10 050	$7{,}0\cdot10^6$	29,3	$5{,}0\cdot10^6$	77,16	$8{,}0\cdot10^6$
4-й	24 400	$11{,}0\cdot10^6$	11 400	$6{,}0\cdot10^6$	14,7	$1{,}0\cdot10^6$	62,96	$5{,}0\cdot10^6$
5-й	21 270	$7{,}0\cdot10^6$	12 450	$2{,}0\cdot10^6$	20,6	$1{,}0\cdot10^6$	78,68	$2{,}0\cdot10^6$
6-й	29 850	$3{,}0\cdot10^6$	14 200	$2{,}0\cdot10^6$	17,58	$0{,}5\cdot10^6$	58,61	$1{,}0\cdot10^6$
7-й	24 220	$0{,}9\cdot10^6$	11 550	$1{,}0\cdot10^6$	6,78	$0{,}1\cdot10^6$	43,66	$0{,}3\cdot10^6$
8-й	39 690	$0{,}2\cdot10^6$	9 050	$0{,}4\cdot10^6$	8,03	$0{,}03\cdot10^6$	15,84	$0{,}2\cdot10^6$

СОДЕРЖАНИЕ

Предисловие 3

И. П. Трегубенко и Д. И. Семенов. Влияние комплексонов на поведение металлов и излучателей в организме. III. Фосфаты 5

Д. И. Семенов и И. П. Трегубенко. Влияние комплексонов на поведение металлов и излучателей в организме. IV. Сравнение действия различных комплексонов 23

В. Г. Куликова. Влияние инкорпорированного церия-144 на плодовитость мышей и развитие их потомства 34

Н. В. Лучник. Лучевые поражения и воздействие на них. IV. Влияние различных веществ, вводимых мышам, на эффект облучения 46

Н. В. Лучник и Е. А. Тимофеева-Ресовская. Лучевые поражения и воздействие на них. V. Влияние цистеина и некоторых других веществ, содержащих серу, на эффект облучения животных и растений 76

Н. В. Лучник. Лучевые поражения и воздействие на них. VI. Действие дрожжевых экстрактов на смертность облученных мышей и на проростки гороха 93

Е. И. Преображенская. Проблема радиостимуляций растений III. Опыты со льдом 119

Н. А. Порядкова. Проблема радиостимуляции растений IV. Опыты с сахарной свеклой 128

Н. В. Лучник. Проблема радиостимуляции растений V. Цитологический анализ явления радиостимуляции 139

Н. А. Порядкова, Н. В. Тимофеев-Ресовский и Н. В. Лучник. Проблема радиостимуляции растений. VI. Опыты по облучению семян гороха и пшеницы рентгеновскими и γ-лучами на разных стадиях замачивания и прорастания 159

Н. В. Тимофеев-Ресовский. Распределение рассеянных элементов по компонентам водоемов. I. Некоторые общие соображения 189

Е. А. Тимофеева-Ресовская и Н. В. Тимофеев-Ресовский. Распределение рассеянных элементов по компонентам водоемов. II. Почвенно-биологическая дезактивация воды в прудах-отстойниках 194

Н. В. Горбатюк и А. Н. Тимофеев. Распределение рассеянных элементов по компонентам водоемов III. Стабилизация радиоактивности свежего раствора осколков урана при равномерном его поступлении в водоем и дозы излучения внутри и вне водоема 224

Б. М. Агафонов, Т. И. Долгих, М. И. Савченко и Н. В. Тимофеев-Ресовский. Распределение рассеянных элементов по компонентам водоемов. IV. Опыты по распределению стронция, рутения, цезия, церия и неразделенного раствора осколков урана в сериях бачков 238

Труды Института биологии, вып. 12
Сборник работ лаборатории биофизики, сб. II

Проблемы биофизики

*

Утверждено к печати
Институтом биологии Уральского филиала
Академии наук СССР

*

Редактор издательства *О. М. Бенюмов*
Технический редактор *В. В. Брузгуль*

*

РИСО АН СССР № 163-70В. Сдано в набор 19/XII 1959 г. Подписано к печати 28/VII 1960 г. Формат 70×108¹/₁₆. 17,5 печ. л. 23,97 усл.печ. л, Уч.-издат. л. 23,0 Тираж 2300 экз. Т-10502.
Изд. № 3435. Тип. зак. № 2550

Цена 16 руб., с 1/I 1961 г. 1 руб. 60 коп.

Издательство Академии наук СССР.
Москва, Б-62, Подсосенский пер., 21

2-я типография Издательства АН СССР.
Москва, Г-99, Шубинский пер., 10

ОПЕЧАТКИ И ИСПРАВЛЕНИЯ

Страница	Строка	Напечатано	Должно быть
21	7 св.	орто-тримета-	орто-, тримета-,
21	11 сн.	IМФ	ГМФ
30	8 сн.	СА	Са
49 66 67	Рис. 1 Рис. 3 Рис. 5	P_t, в % контроля	P_t
52	Рис. 2, третий график слева	600 800 1000	400 600 800
53	8 св.	надежными	ненадежными
65	37 сн.	a_t	a_i
65	31 сн.	P	P_t
71	9 св.	СаА	СоА
72	3 св.	танин, тиамин	тиамин
96	11 сн.	тех	тех же
107	Табл. II, графа I	6·5	625
171	Табл. 6, заголовок	500	5000
173	Рис. 4, подпись	результатов	результатов (вес зерна)
182	37 св.	кислоты и	кислоты в
228	8 св.	$D_2 = \frac{h_1}{h_1+h_2}$	$D_2 = \frac{h_2}{h_1+h_2}$
237	3 сн.	Med	Mod