

Г. Г. ПОЛИКАРПОВ

**МАТЕРИАЛЫ ПО КОЭФФИЦИЕНТАМ НАКОПЛЕНИЯ
 P^{32} , S^{35} , Sr^{90} , Y^{91} , Cs^{137} и Ce^{144} В МОРСКИХ ОРГАНИЗМАХ****ВВЕДЕНИЕ**

В век атомной энергии совершенно очевидна крайняя необходимость и актуальность изучения судьбы осколочных и наведенных радиоактивных изотопов, из различных источников и разными путями попадающих в природу или создающих потенциальную угрозу появления во внешней среде. Развитие исследований по данной проблеме нуждается в значительном форсировании в связи с тем, что, во-первых, в природу уже внесено и продолжает поступать заметное количество радиоактивных продуктов (Геденов, 1957; Шведов, Блинов, Геденов и Анкудинов, 1958; Акамсин, Парчевский и Поликарпов, 1960) и, во-вторых, прогресс ядерной промышленности связан с образованием и удалением огромных количеств высокорadioактивных отходов (Жадин, Кузнецов и Тимофеев-Ресовский, 1959; Спицын и Колычев, 1960).

Источники появления в морях и океанах искусственно радиоактивных изотопов подразделяются, прежде всего, на глобальные и локальные. К первым принадлежат главным образом взрывы ядерного оружия и, в меньшей степени, аварии реакторов на атомных заводах. При этом радиоактивное облако, возникшее в результате аварийного выброса реактора или при испытании килотонных ядерных бомб, не выходит за пределы тропосферы и в течение примерно месяца оседает на земной поверхности. Радиоактивные частицы после взрыва мегатонных ядерных бомб попадают в стратосферу, откуда медленно оседают на земную поверхность (Libby, 1956). Источники локального загрязнения более разнообразны. Очевидно, что сильное загрязнение близлежащих участков морской акватории происходит в районах испытания ядерного оружия (Тихий океан) или аварий на атомных заводах (Уиндскейл, западное побережье Англии) и ядерных кораблях (DuShane, 1959). Подсчитано, что возможная авария реактора в 200 тыс. *кв*, расположенного на юго-востоке Англии, может иметь тяжелые последствия для Франции, Бельгии и Германии. В случае аварии атомного корабля с реактором в 50 тыс. *кв* в Северном море рыба через 10 дней будет заражена до 10^{-4} *мккюри/г* на большом протяжении морского побережья, а радиоактивность будет входить с приливами в устья рек (Крепс, 1959).

Функционирующие и строящиеся атомные реакторы на морском побережье или на крупных реках в США, Англии и Японии спускают или планируют удалять жидкие «малоактивные» отходы непосредственно в море или предварительно в реки. Так, реакторы в Уиндскейле сбрасывают в Ирландское море до 3 тыс. *кюри* в месяц (Dunster, 1958). Наиболее сложной является проблема удаления высокоактивных отходов, образующихся при обработке смеси осколочных продуктов деления урана и плутония. Считается, что ежегодно производится около 1 тыс. *т* отходов, содержащих осколочные

продукты, активностью в миллионы кюри (Revelle a. Schaefer, 1958). Высокоактивные отходы сбрасываются США и Англией в различных районах Атлантического и Тихого океанов.

Большая экономическая заинтересованность атомной промышленности в наиболее дешевом способе удаления отходов высокой активности поставила перед учеными вопрос о возможности использовать для этого глубочайшие впадины в Тихом океане. Работами В. Г. Богорова и Е. М. Крепса (1958) показано, что глубоководные океанические впадины не могут служить безопасным местом захоронения таких отходов. Основываясь на прежних данных о крайне медленном водообмене глубинных вод с поверхностными (2500—5000 лет), специальная комиссия США по действию атомной радиации на океанографические процессы и рыболовство (1956, 1957) обратила внимание на Черное море, как на возможное место захоронения отходов атомных производств многих стран. Новейшими исследованиями (Водяницкий, 1958; Богданова, 1960; Скопинцев, 1959) показано, что время выхода придонных вод Черного моря на поверхность составляет 60—130 лет.

Международная конференция по захоронению радиоактивных отходов, состоявшаяся в ноябре 1959 г. в Монако, выявила недостаточность научных знаний, на основании которых должны строиться прогнозы поведения осколочных и мишенных радиоизотопов в морях и океанах. В этой связи особенно очевидна необходимость интенсификации исследований по всем вопросам, входящим в общую проблему радиоактивного загрязнения морей и их пищевых ресурсов, в том числе по вопросу о способности массовых и промысловых морских организмов концентрировать в себе важнейшие радиоизотопы. Решение данного вопроса даст возможность судить как о роли массовых организмов в миграции радиоактивных загрязнителей среды в море, так и о степени опасности употребления в пищу промысловых морских растений и животных при различных уровнях радиоактивности в морской воде. Несомненно, что такой материал имеет прямое отношение к теоретическим дисциплинам — биогеохимии и биогеоценологии, а также к вопросам минерального обмена микроэлементов в организмах (Вернадский, 1940; Виноградов, 1933; Тимофеев-Ресовский, 1957; Тимофеев-Ресовский, Порядкова, Сокурова и Тимофеева-Ресовская, 1957; Тимофеев-Ресовский, Тимофеева-Ресовская, Милютин и Гецова, 1960).

В настоящем сообщении приводятся данные о коэффициентах накопления шести осколочных и наведенных радиоизотопов в различных растениях и животных Черного моря; их независимости в широких пределах от концентрации изотопа в водной среде; величинах коэффициентов накопления при однократном внесении изотопа и постоянном поддержании его концентрации на одном и том же уровне; изменениях коэффициентов накопления важнейших осколочных продуктов при детритообразовании. Постановка таких работ на морях диктуется незначительным размахом исследований в этом направлении, далеко не соответствующим важности проблемы (Поликаров, 1960а—г).

МАТЕРИАЛ И МЕТОДИКА

В наших экспериментах изучались зеленые, бурые и красные водоросли, зоостера, представители кишечнораотовых, моллюсков и ракообразных. Материал добывался при помощи легководолазной техники, что позволило подбирать организмы из одной популяции. Исследования были подвергнуты P^{32} , S^{35} , Sr^{90} , Y^{91} , Cs^{137} и Ce^{144} в концентрациях по 10 мккюри/л, кроме специальных опытов с различными концентрациями Y^{91} в среде. Опыты ставились в стеклянных аквариумах с профильтрованной морской водой, объемом от 2,5 до 6 л. Представители различных видов помещались в отдель-

Таблица 1

Накопление Sr^{90} и Ce^{144} в цистозире при поддержании постоянной концентрации их в растворе

Элемент	Характеристика	Номер аквариума	Время от начала опыта, сутки					Среднее для равновесного состояния
			3 часа	2	4	6	8	
Sr^{90}	<i>имп/мин/мл</i> воды (до смены)	1	1 610	1 520	1 802	1 751	1 906	1 755
		2	1 822	1 679	1 903	1 824	1 931	
	<i>имп/мин/г</i> сырого веса	1	28 600	78 000	79 700	83 700	82 500	79 028
		2	26 400	72 000	78 300	82 700	75 300	
	<i>сырой</i> <i>сухой</i> вес	1	8,2	6,2	7,7	8,9	7,9	7,4
		2	6,6	6,8	7,6	8,1	5,9	
	Коэффициенты накопления на сухой вес	1	131	380	327	354	321	328
		2	104	318	298	336	289	
	на сырой вес	1	18	51	44	48	43	44
		2	14	43	40	45	39	
Ce^{144}	<i>имп/мин/мл</i> воды (до смены)	1	1 213	833	1 421	1 231	1 428	1 198
		2	1 459	750	1 008	1 179	1 462	
	<i>имп/мин/г</i> сырого веса	1	39 100	86 600	77 000	269 500	352 000	307 875
		2	26 200	71 800	148 800	253 000	357 000	
	<i>сырой</i> <i>сухой</i> вес	1	7,6	6,8	7,4	7,6	8,8	7,3
		2	7,5	6,6	4,6	8,1	7,0	
	Коэффициенты накопления на сухой вес	1	235	760	1 360	1 754	1 795	1 723
		2	131	700	1 075	1 570	1 775	
	на сырой вес	1	32	104	186	240	246	236
		2	18	96	147	215	243	

ные сосуды. Обеспечивалась повторность опытов. Коэффициенты вариации данных, получаемых в наших опытах, для одних и тех же индивидуумов (талломы цистозир), т. е. за счет отбора проб, взвешивания, высушивания, приготовления и радиометрического просчета препаратов, составили около 5%, а для разных особей, за счет биологической вариабильности, — до 10—20%. Коэффициенты накопления в различных опытах отличаются для одного и того же элемента не более, чем в 2—3 раза. Продолжительность опытов, в зависимости от объекта, была различной, доходя в некоторых случаях до 64 суток. Параллельные пробы воды и организмов отбирались через 3, 6, 12 час.; 1, 2, 4, 8, 16, 32, 64 суток. Водные пробы в алюминиевых тарелочках высушивались под инфракрасной лампой. Организмы ополаскивались в чистой морской воде, обсушивались на фильтровальной бумаге и тотчас взвешивались. После высушивания организмов при 80—90° в сушильных шкафах до постоянного веса взвешивание повторялось. Высушенный материал растирался в фарфоровых ступках. Из порошка приготавливались в стандартных алюминиевых тарелочках навески около 10 мг. Препараты просчитывались на установках Б-2 и Флокс с торцовыми счетчиками в свинцовой защите. Все измерения по контрольному препарату пересчитывались на показания одной установки. Для мягких бета-излучателей вводилась поправка на самопоглощение излучений в препаратах, для короткоживущих — поправка на радиоактивный распад. Препараты со Sr^{90} считались после установления радиоактивного равновесия с Y^{90} .

При пересчете концентрации изотопа, выраженной в *имп/мин/г* сухого веса (в условиях постоянной геометрии), на 1 г живого организма использовалось среднее для каждого опыта отношение сырого веса к сухому, что значительно уменьшало флуктуации цифр по сравнению с использованием индивидуальных отношений сырых и сухих весов. От опыта к опыту упомянутое отношение колеблется в сравнительно небольших пределах. В процессе отмирания организмов наблюдается характерное для каждого вида изменение отношения сырого веса к сухому в сторону увеличения; в этих случаях цифровые значения данного отношения не усреднялись.

Под коэффициентом накопления понимается отношение концентраций радиоизотопа в организме и окружающей воде.

РЕЗУЛЬТАТЫ ОПЫТОВ

В табл. 1 приведен материал по накоплению Sr^{90} и Ce^{144} в цистозире в условиях ежедневной смены морской воды и возобновления исходных концентраций этих изотопов. Для стронция характерно наступление равновесного состояния (явления насыщения) ко вторым суткам, а для церия — через 6 дней. Предельные коэффициенты накопления, отражающие способность организма поддерживать определенный градиент концентраций того или иного элемента со средой при стационарном режиме, равны в случае $Sr-44$ для $Ce-236$. В табл. 2 приведены данные о концентрациях двух изотопов в аквариальной воде на протяжении опытов, причем активность Sr^{90} в воде от смены к смене падает менее значительно, чем активность Ce^{144} , что легко объясняется гораздо большими коэффициентами накопления последнего в цистозире.

В связи с тем, что наиболее удобной формой эксперимента по накоплению химических элементов водными организмами является однократное внесение радиоизотопов в аквариумы, был поставлен опыт, в котором выяснялась зависимость коэффициентов накопления изотопов редких и рассеянных элементов в организме от их концентрации в эдафической среде (табл. 3). Как видно из табл. 3, такой зависимости не наблюдается в широких

Таблица 2

Концентрация Sr^{90} и Ce^{144} в воде на протяжении опыта

Элемент	Номер аквариума	Время отбора проб воды	Время от начала опыта, сутки							
			3 часа	1	2	4	5	6	7	8
Sr^{90}	1	До смены . .	1610	—	1520	1802	1822	1751	1916	1906
		После смены .	—	1815	2085	1996	1806	1912	1808	—
	2	До смены . .	1822	—	1679	1903	1828	1824	1868	1931
		После смены .	—	2001	1855	1844	1828	1780	2130	—
Ce^{144}	1	До смены . .	1213	—	833	711	958	1231	1499	1074
		После смены .	—	1717	2031	2446	2281	2707	2565	—
	2	До смены . .	1459	—	750	1008	953	1179	1548	1462
		После смены .	—	1731	1963	1875	2120	2466	2470	—

пределах — по крайней мере от 1 до 1000 мккюри/л . Таким образом, показана обоснованность постановки исследований коэффициентов накопления в морских организмах радиоизотопов при однократном внесении последних. В таких опытах (табл. 1 и 5) величины коэффициентов накопления Sr^{90} совпадают с таковыми при поддержании его постоянной концентрации в растворе. Аналогичное справедливо и для Ce^{144} (табл. 1 и 8).

Таблица 3

Коэффициенты накопления Y^{91} в ульве (на сырой вес) при различных концентрациях его в растворе

Концентрация, мккюри/л	Номер аквариума	Время от начала опыта, сутки		
		1	2	4
1	1	92	156	192
	2	56	206	171
10	1	97	131	124
	2	56	174	161
25	1	78	129	380
	2	56	114	240
1000	1	34	74	258
	2	59	91	217
Среднее		66	135	217

В противоположность P^{32} (Поликарпов, 1960 б) распределение S^{35} (в виде сульфат-ионов) между организмами и водной средой измеряется крайне низкими коэффициентами накопления — от 0,1 до 1,6 (табл. 4). Раковины моллюсков вовсе не аккумулируют S^{35} .

Из табл. 5 следует, что зеленые и красные водоросли, zostера, актинии и тело мидий являются слабыми концентраторами Sr^{90} из раствора, тогда как бурые водоросли, раковины мидий, креветки и крабы накапливают его в заметных количествах: коэффициенты накопления во всех видах бурых водорослей составляют 18—43 а в раковинах моллюсков и в ракообразных

Таблица 4

Накопление S^{35} в некоторых морских организмах*

Время отбора проб, сутки	Имп/мин/мл воды $\cdot 10^3$ — верхний ряд цифр и коэффициенты накопления на сырой вес — нижний ряд									
	<i>Ulva rigida</i>	<i>Enteromorpha compressa</i>	<i>Byropsis plumosa</i>	<i>Cystoseira barbata</i>	<i>Ceramium rubrum</i>	<i>Gelidium latifolium</i>	<i>Actinia equina</i>	<i>Nassa reticulata</i> (тело)	<i>Rapana besoar</i> (тело)	<i>Mytilus galloprovincialis</i> (тело)
3 час.	1,0	0,9	0,8	0,9	1,0	0,8	1,7	1,6	1,6	1,7
	0,0	0,0	0,0	0,1	0,0	0,1	0,4	0,1	0,1	0,
1	0,5	0,5	0,6	0,6	0,5	0,6	1,7	1,6	1,6	1,7
	0,2	0,1	0,2	0,1	0,1	0,3	0,4	0,2	0,4	0,4
2	0,5	0,5	0,6	0,6	0,5	0,6	1,8	1,6	1,6	1,7
	0,2	0,1	0,1	0,2	0,1	0,2	0,5	0,3	0,1	0,2
4	0,6	0,5	0,6	0,6	—	0,6	1,7	1,6	1,6	1,8
	0,8	0,2	0,2	0,2	—	0,3	0,2	0,2	0,5	0,3
8	0,6	0,6	0,6	0,6	—	—	1,6	1,7	1,7	1,7
	1,4	0,4	0,5	0,3	—	—	0,4	0,3	0,3	0,5
16	0,6	0,5	0,5	—	—	—	1,6	1,6	1,6	—
	2,9	0,7	0,3	—	—	—	0,5	0,4	0,1	—
32	0,6	—	—	—	—	—	1,4	—	—	—
	2,3	—	—	—	—	—	0,2	—	—	—
Сырой вес	6,4	14,5	18,9	8,9	11,9	9,1	10,0	3,6	3,8	9,1
Сухой										

* Все виды моллюсков имеют коэффициенты накопления S^{35} в раковинах, близкие к нулю.

непрерывно нарастают в течение опыта, не показывая признаков достижения состояния равновесия.

Коэффициенты накопления Y^{91} имеют высокие значения для зеленых, красных и бурых водорослей, zostеры, раковин мидий и ракообразных — порядка сотен, а для актиний и тела мидий — десятков (табл. 6).

Наименьшие коэффициента накопления Cs^{137} отмечаются в zostере (2) и ульве (4); в актиниях, теле мидий и в филлофоре они достигают 7—12, а в цистозире — 27 (табл. 7).

Табл. 8 иллюстрирует неспецифичность аккумуляции Ce^{144} в отношении различных групп растений: во всех случаях соответствующие коэффициенты выражаются сотнями. Такие же коэффициенты характерны для крабов, тела мидий и актиний. И только раковины мидий обладают коэффициентами накопления на порядок ниже. Легко заметить, что ближайший к церию лантаноид празеодим дает сходные с ним величины коэффициентов накопления в ульве. Более того, сходство простирается и на главного представителя другой группы редкоземельных элементов — иттрия, также характеризующегося, большей частью, высокими коэффициентами накопления.

Сводный материал по усредненным для двух последних временных точек коэффициентам накопления для всех изучавшихся нами элементов в ряде

Таблица 5

Накопление Sr^{90} в некоторых морских организмах

Время отбора проб, сутки	Имп/мин/мг воды $\cdot 10^3$ — верхний ряд цифр и коэффициенты накопления на сухой вес — нижний ряд														
	<i>Ulva rigida</i>	<i>Enteromorpha minor</i>	<i>Dictyota fasciola</i>	<i>Padina pavonia</i>	<i>Cystoseira barbata</i>	<i>Corallina officinalis</i>	<i>Ceramium rubrum</i>	<i>Polysiphonia elongata</i>	<i>Phyllophora rubens</i>	<i>Laurencia obtusa</i>	<i>Zostera marina</i>	<i>Actinia equina</i>	<i>Mytilus galloprovincialis</i> (ред. раковина)	<i>Leander squilla</i>	<i>Pachygrapsus marmoratus</i>
3 час.	2,1	2,2	2,2	2,1	1,4	2,3	1,8	2,4	2,0	1,8	2,0	1,9	1,5	1,9	2,0
	0,9	1,0	16,2	11,8	41,5	2,0	0,1	0,3	1,2	0,7	1,0	0,5	0,3 0,2	0,2	0,1
6 час.	2,0	2,0	1,9	2,1	1,4	2,1	1,8	2,3	2,0	1,7	—	1,9	1,5	1,9	1,9
	0,7	0,8	17,6	10,9	37,0	3,2	0,3	0,2	1,2	0,8	—	0,5	0,2 0,2	0,2	0,3
12 час.	2,1	2,2	1,9	2,1	1,4	2,1	1,8	2,1	2,0	1,8	—	1,9	1,6	1,9	1,8
	1,1	0,9	17,7	16,5	37,1	2,8	0,3	0,3	1,5	0,8	—	0,4	0,5 0,3	0,9	0,4
1	2,0	2,1	1,7	2,0	1,4	2,1	1,7	2,1	2,0	1,8	—	2,0	1,6	2,0	1,8
	1,3	0,8	17,4	17,6	39,1	3,5	0,4	0,5	1,3	0,9	—	0,5	0,5 0,2	0,9	0,4
2	2,1	2,0	1,7	2,0	1,3	2,1	1,9	2,2	2,0	1,7	2,0	2,0	1,5	2,0	1,8
	1,6	1,1	17,6	17,7	47,8	4,3	1,3	1,0	1,5	1,1	1,9	0,4	0,5 0,3	2,2	0,5
4	2,1	2,0	—	2,0	1,2	2,1	—	—	2,0	1,7	2,0	1,9	1,5	1,9	1,7
	1,3	0,8	—	19,6	44,0	4,4	—	—	1,4	1,1	2,7	0,6	0,4 0,4	2,7	1,5
8	2,0	2,0	—	—	1,3	2,1	—	—	2,0	1,7	2,0	1,8	1,8	1,8	1,6
	1,6	1,1	—	—	41,0	4,5	—	—	5,4	1,3	2,9	0,5	0,5 1,0	7,9	3,2
16	1,9	1,9	—	—	—	—	—	—	2,0	—	—	2,3	1,9	—	—
	1,8	1,3	—	—	—	—	—	—	9,4	—	—	0,4	0,6 2,5	—	—
32	1,9	—	—	—	—	—	—	—	2,0	—	—	1,1	1,9	—	—
	2,3	—	—	—	—	—	—	—	6,2	—	—	1,3	0,4 4,0	—	—
64	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	1,8	—	—
	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	0,7 5,6	—	—
Сухой вес	7,0	13,0	8,3	7,6	6,7	2,3	13,0	13,2	5,0	11,2	9,3	6,9	5,2 1,0	4,5	3,1

Таблица 6

Накопление Y^{91} в некоторых морских организмах

Время отбора проб, сутки	Имг/мин/мл·10 ³ — верхний ряд цифр и коэффициенты накопления на сырой вес — нижний ряд										
	<i>Ulva rigida</i>	<i>Enteromorpha compressa</i>	<i>Bryopsis plumosa</i>	<i>Cystoseira barbata</i>	<i>Ceramium rubrum</i>	<i>Zostera marina</i>	<i>Actinia equina</i>	<i>Mytilus galloprovincialis</i>	<i>Gammarus locusta</i>	<i>Idothea baltica</i>	
3 час.	1,0 90	0,7 55	0,5 127	0,1 17	0,9 46	0,4 14	1,0 3	0,2 3 20	2,0 24	2,0 28	
6 час.	1,0 112	0,4 134	0,6 86	0,1 34	0,6 82	— —	1,0 3	0,2 3 20	2,0 30	2,0 28	
12 час.	1,0 110	0,3 198	0,3 257	0,08 54	0,7 62	— —	1,0 4	0,2 3 30	1,0 111	1,0 101	
1	0,8 129	0,3 156	0,4 138	0,07 72	0,4 157	— —	0,8 6	0,2 2 90	1,0 98	1,0 115	
2	0,7 180	0,3 164	0,3 238	0,07 82	0,3 179	0,2 166	0,7 9	0,2 7 100	— —	— —	
4	0,6 230	0,2 115	0,1 143	0,05 92	— —	0,2 239	0,6 8	0,2 12 250	— —	— —	
8	0,2 897	0,2 248	0,2 426	0,03 223	— —	0,2 171	0,2 18	— — —	— —	— —	
16	0,1 998	0,04 627	0,1 687	— —	— —	— —	0,04 20	— — —	— —	— —	
32	0,1 812	— —	— —	— —	— —	— —	0,1 38	— — —	— —	— —	
Сырой Сухой	7,0	13,8	11,1	7,0	15,0	8,9	7,6	5,8	1,0	4,6	4,5

морских растений и животных представлен в табл. 9. К специфическим накопителям важнейших радионуклидов — Sr^{90} , Y^{91} , Cs^{137} и Ce^{144} — относятся бурые водоросли. Из числа элементов наименьшие коэффициенты накопления найдены для S^{35} (0,1—2,6), промежуточное положение занимают Sr^{90} и Cs^{137} (единицы и десятки), высокие коэффициенты накопления в общем отличаются P^{32} и редкоземельную группу — Y^{91} , Rf^{143} и Ce^{144} (сотни).

Величины коэффициентов накопления на сухой вес (табл. 9) характеризуют роль органических веществ, по большей части являющихся биоконплексонами (Семенов, 1958; Тимофеев-Ресовский и Тимофеева-Ресовская, 1959), в аккумуляции элементов живыми существами из водной среды. При этом сравнительные уровни накопления в организмах разных видов различны для сырого и сухого веса в связи с различными их коэффициентами усушки.

В табл. 10 приведены данные опытов по изучению роли детритообразования (гибель к восьмым суткам и последующий распад цистозеры) в дальнейшей судьбе основных излучателей — Sr^{90} , Cs^{137} и Ce^{144} . Выявлены

Таблица 7

Накопление Cs^{137} в некоторых морских организмах

Время отбора проб, сутки	Имп/мин/мл воды $\cdot 10^3$ — верхний ряд цифр и коэффициент накопления на сырой вес — нижний ряд					
	<i>Ulva rigida</i>	<i>Cystoseira barbata</i>	<i>Phyllophora rubens</i>	<i>Zostera marina</i>	<i>Actinia equina</i>	<i>Mytilus galloprovincialis</i> * (тело)
3 час.	1,1	0,8	1,0	1,8	0,9	0,9
	0,7	5,8	3,6	0,8	0,9	1,0
6 час.	1,1	0,8	1,0	—	0,8	0,8
	0,8	4,4	4,1	—	1,3	1,6
12 час.	1,1	0,6	0,8	—	0,9	0,9
	0,9	6,3	5,3	—	1,4	2,5
1	1,1	0,7	1,0	—	0,8	0,8
	1,0	7,4	5,3	—	2,1	2,6
2	1,0	0,7	0,8	1,9	0,9	0,9
	1,4	9,5	8,2	2,0	2,8	5,1
4	1,0	0,6	1,0	1,9	0,6	0,6
	1,7	18,8	8,6	1,9	4,3	9,1
8	0,9	0,5	0,8	2,0	0,6	0,6
	3,4	27,0	11,0	1,8	8,3	12,9
16	0,8	—	0,9	—	0,7	0,7
	3,9	—	9,2	—	7,0	10,5
32	0,7	—	0,6	—	0,5	—
	3,7	—	10,2	—	7,4	—
Сырой вес .	9,3	7,4	4,9	8,7	7,6	8,1
Сухой						

* Раковины заметно не накапливают Cs^{137} .

две противоположные тенденции: 1) выход стронция обратно в водную среду (коэффициенты накопления стремятся к единице) и 2) удержание цезия и церия в органических остатках и их дополнительная сорбция на детрите.

ОБСУЖДЕНИЕ

Результаты, приведенные в табл. 1—3, 5—7, свидетельствуют в пользу методики однократного внесения радиоизотопов в морскую воду для изучения их коэффициентов накопления в морских организмах. В отношении пресноводных растений и животных такая методика убедительно обоснована в целой серии работ (Тимофеева-Ресовская, Агафонов и Тимофеев-Ресовский, 1958; Тимофеева-Ресовская и Тимофеев-Ресовский, 1958; Повелягина и Телитченко, 1959; Тимофеева-Ресовская, Тимофеева и Тимофеев-Ресовский, 1959).

Представляет значительный интерес сопоставление величин коэффициентов накопления радионуклидов в пресноводных и морских организмах. Сравнение наших данных с материалом по средним коэффициентам накопления различных радиоизотопов разными пресноводными организмами

Накопление Pb^{143} и Ce^{144} в некоторых морских организмах

Время отбора проб, сутки	Имп/мин/мл воды · 10 ³ — верхний ряд цифр и коэффициенты накопления на сырой вес — нижний ряд													
	Pr ¹⁴³	Ce ¹⁴⁴												
	Ulva rigida	Ulva rigida	Entero- morpha minor	Bryopsis plumosa	Cystoseira barbata	Corallina officinalis	Ceramium rubrum	Phyllopho- ra rubens	Lauren- cia obtusa	Zostera marina	Actinia equina	Mytilus gallopro- vincialis тело, Храковина	Pachygra- pus marmoratus	
3 час.	1,0	2,3	2,1	3,4	2,5	3,4	2,7	2,7	3,0	1,5	1,1	1,1	1,2	
	103	45	33	9	16	21	59	27	8	15	2	4 12	36	
6 час.	1,0	2,3	1,9	3,3	1,5	2,7	1,9	2,0	2,3	—	0,9	0,9	1,1	
	115	43	35	18	14	34	60	65	18	—	3	19 12	40	
12 час.	0,5	1,8	1,1	2,1	0,9	1,7	1,2	1,1	1,4	—	0,7	0,7	0,9	
	242	62	86	13	86	34	136	138	40	—	5	17 20	41	
1	0,5	0,7	0,6	1,4	0,5	1,4	0,8	0,9	1,0	—	0,5	0,5	0,4	
	234	242	134	33	118	100	278	187	95	—	7	20 43	73	
2	0,4	0,6	0,4	1,0	0,3	0,8	0,4	0,4	0,8	1,2	0,3	0,3	0,3	
	405	287	277	61	211	145	587	399	84	69	14	60 57	134	
4	0,4	0,5	0,3	0,8	0,4	0,8	—	0,5	0,8	1,2	0,3	0,3	0,4	
	245	278	297	130	358	228	—	304	124	69	10	91 80	74	
8	0,4	0,5	0,3	0,5	0,3	0,3	—	0,3	0,3	0,4	0,06	0,06	0,2	
	214	421	376	185	343	426	—	604	297	182	28	337 51	200	
16	0,4	0,3	0,4	1,0	—	—	—	0,1	—	—	0,03	0,03	0,1	
	174	484	302	1102	—	—	—	1311	—	—	113	356 43	231	
32	—	0,5	—	—	—	—	—	0,1	—	—	0,03	—	—	
	—	220	—	—	—	—	—	845	—	—	165	—	—	
Сырой Сухой вес	9,4	7,6	15,4	12,7	7,4	3,0	15,1	4,8	8,5	9,9	8,1	7,3 1,0	2,9	

Таблица 9

Средние коэффициенты накопления различных изотопов в некоторых морских организмах

Таксономическая категория	Вид	Средние коэффициенты накопления											
		Живой вес						Сухой вес					
		P 32	S 35	Sr 90	Y 91	Cs 137	Ce 144	P 32	S 35	Sr 90	Y 91	Cs 137	Ce 144
Зеленые водоросли	Ulva rigida	328	2,6	2	905	4	352	2500	16	14	6330	37	2680
	Enteromorpha minor *	—	0,6	1	627	—	339	—	8	13	8660	—	5220
	Bryopsis plumosa	—	0,4	—	687	—	644	—	8	—	7620	—	8190
Бурые водоросли	Dictyota fasciola	—	—	18	—	—	—	—	—	150	—	—	—
	Padina pavonia	—	—	19	—	—	—	—	—	145	—	—	—
	Cystoseira barbata	—	0,3	43	223	27	352	—	3	288	1560	200	2600
Красные водоросли	Corallina rubens	—	—	4	—	—	327	—	—	9	—	—	980
	Ceramium rubrum	—	0,1	1	160	—	433	—	1	13	2400	—	6500
	Polysiphonia elongata	—	—	1	—	—	—	—	—	13	—	—	—
Цветковые растения	Phyllophora rubens	—	—	8	—	10	1078	—	—	40	—	50	5170
	Laurencia obtusa	—	—	1	—	—	212	—	—	11	—	—	1800
	Gelidium latifolium	—	0,3	—	—	—	—	—	3	—	—	—	—
Кишечнополостные	Zostera marina	51	—	3	205	2	126	470	—	28	1825	17	1250
Моллюски	Actinia equina	33	0,4	1	38	7	139	250	4	7	289	53	1126
	Mytilus galloprovincialis												
	тело	357	0,4	0,6	12	12	347	2600	4	3	70	97	2540
	раковина	27	0,0	6	250	0	43	27	0	6	250	0	43
	Rapana besoar												
	тело	—	0,2	—	—	—	—	—	1	—	—	—	—
	раковина	—	0,0	—	—	—	—	—	0	—	—	—	—
	Ostrea taurica												
	тело	29	—	—	—	—	—	200	1	—	—	—	—
Ракообразные	раковина	30	—	—	—	—	—	30	0	—	—	—	—
	Leander squilla	—	—	8	—	—	—	—	—	36	—	—	—
	Pachygrapsus marmoratus	—	—	3	—	—	216	—	—	9	—	—	627
	Gammarus locusta	—	—	—	104	—	—	—	—	—	479	—	—
	Idothea baltica	—	—	—	108	—	—	—	—	—	496	—	—

* В опыте с Y 91 использовался близкий вид — E. compressa.

Таблица 10

Поведение Sr^{90} , Cs^{137} и Ce^{144} при отмирании цистозеры (в %)

Время, сутки	Sr^{90}			Cs^{137}			Ce^{144}		
	имп./мин/г	коэфф. накопления	имп./мин/мл	имп./мин/г	коэфф. накопления	имп./мин/мл	имп./мин/г	коэфф. накопления	имп./мин/мл
4	100	100	100	100	100	100	100	100	100
8	23	11	124	110	127	88	117	314	62
16	22	11	133	370	247	90	145	468	42
32	23	6	139	278	227	73	140	590	42
64	—	—	—	383	354	70	130	495	42

(Тимофеев-Ресовский, 1957, Тимофеева-Ресовская, Попова и Поликарпов, 1958; Поликарпов, 1958; Тимофеева-Ресовская и Тимофеев-Ресовский, 1958; Тимофеева-Ресовская, Тимофеева и Тимофеев-Ресовский, 1959; Тимофеев-Ресовский и Тимофеева-Ресовская, 1959; Тимофеев-Ресовский, Тимофеева-Ресовская, Милютина и Гецова, 1960) показывает, что коэффициенты накопления S^{35} , Sr^{90} и Cs^{137} в морских организмах гораздо ниже (примерно на порядок величин), чем таковые в пресноводных, тогда как коэффициенты накопления Y^{91} и Ce^{144} заметно не отличаются в этих двух случаях.

Последнее можно объяснить крайне малыми концентрациями их изотопных носителей — стабильных изотопов иттрия и церия — в морской и пресной воде. S^{35} разбавляется значительными количествами нерадиоактивной серы. Для Sr^{90} и Cs^{137} вступают в силу закономерности, управляющие метаболическими отношениями $\frac{\text{стронций}}{\text{кальций}}$ и $\frac{\text{цезий}}{\text{калий}}$ в организмах и в воде.

Зеленые и, по-видимому, красные морские водоросли и морские травы имеют отношение $\frac{\text{стронций}}{\text{кальций}}$ равным или меньше такового в морской воде, а в бурых — десятки раз больше (Webb, 1937; Wilson a. Fieldes, 1941; Wiseman, 1955). В связи с этим коэффициенты накопления стронция в зеленых и красных водорослях и зостере составляют величины около единицы, а в бурых — десятки (на сырой вес). Таким образом, способность бурых водорослей накапливать стронций из водной среды сравнима со способностью пресноводных зеленых водорослей и цветковых растений (коэффициенты накопления для тех и других — сотни единиц на сухой вес). Данные по накоплению стронция-90 черноморскими водорослями и мидиями находятся в согласии с данными по атлантическим макрофитам (Sprooger, 1949) и тихоокеанским устрицам (Boroughs, Chipman a. Rice, 1957).

Как показали наши опыты по выяснению роли детритообразования в дальнейшей судьбе некоторых излучателей, Sr^{90} возвращается в водную среду, а Cs^{137} и Ce^{144} не только переходят в детрит из гибнущих растений, но и дополнительно сорбируются на их органических остатках. Это означает, что наиболее опасный из осколочных продуктов деления — Sr^{90} , в противоположность Cs^{137} и Ce^{144} , не склонен переходить с детритом в донные отложения (Поликарпов, 1961). К тому же, данные по сорбции ряда изотопов морскими грунтами, полученные в нашей лаборатории А. Д. Акаминым (статья в наст. томе), свидетельствуют о практическом отсутствии сорбции Sr^{90} мидиевым илом, песком и гравием и в то же время значительной адсорбционной способности этих грунтов в отношении Ce^{144} . Индифферент-

ными к адсорбции на грунтах оказались P^{32} , S^{35} , хорошо сорбирующимся Y^{91} ; промежуточное положение занял Cs^{137} , который заметно (на 50%) сорбируется лишь мидиевым илом.

Изложенные факты позволяют в первом приближении указать на возможные дело для изучавшихся излучателей в море:

P^{32} — морские организмы и морская вода,

S^{35} — морская вода,

Sr^{90} — морская вода и морские организмы,

Y^{91} — морские организмы и грунты,

Cs^{137} — морская вода, морские организмы и отложения органического происхождения.

Ce^{144} (и Pg^{143}) — морские организмы и грунты.

Следовательно, наиболее лабильными излучателями в море являются радиоизотопы фосфора, серы, стронция и отчасти цезия. Несмотря на то, что Y^{91} и Ce^{144} могут легко переходить в донные отложения с отмирающей биомассой, существует возможность длительного удержания этих элементов в верхней толще океана планктонными организмами (Крепс, 1959).

Если учесть коэффициенты накопления различных излучателей в морских организмах и их предельно допустимые концентрации в воде и пищевых продуктах, то можно рассчитать степень биологической опасности Sr^{90} , которая даже при его невысоких коэффициентах накопления превышает опасность от таких высокотоксичных радиоизотопов, как Y^{91} и Ce^{144} (Поликарпов, 1960в). Итак, Sr^{90} не только гидрологически и биогеохимически весьма лабильный, но и биологически наиболее опасный излучатель в море, чем все остальные изучавшиеся в настоящей работе радиоизотопы (Polikarpov, 1961).

На основании новых данных о скорости водообмена Черного моря (Водяницкий, 1958, Богданова, 1959, Скопинцев, 1959) представляется возможным рассчитать долю Sr^{90} , которая успеет выйти на дневную поверхность и начать биологическую миграцию. За этот период (от 60 до 130 лет) общее исходное количество Sr^{90} уменьшится всего в 5—30 раз, т. е. Черное море не отвечает основным требованиям, предъявляемым к международному пункту по захоронению высокорadioактивных отходов атомных производств.

ВЫВОДЫ

1. Коэффициенты накопления Sr^{90} и Ce^{144} в цистозире в условиях поддержания постоянного уровня активности в морской воде и при однократном внесении активности в воду тождественны при достижении равновесия для каждого элемента.

2. Коэффициенты накопления Y^{91} в ульве не зависят от его концентрации, по крайней мере в диапазоне 10^{-6} — 10^{-3} кюри/л.

3. Специфическими концентраторами P^{32} являются ульва, зоостера и тело мидий; Sr^{90} — бурые водоросли, раковины мидий и ракообразные; Y^{91} — представители всех типов водорослей, зоостера, раковины мидий и ракообразные; Cs^{137} — цистозира, филлофора, актинии и тело мидий; Ce^{144} — водоросли разных типов, зоостера, актинии, тело мидий и крабы. Pg^{143} обладает такими же, как у Ce^{144} , коэффициентами накопления в ульве. Бурые водоросли принадлежат к специфическим накопителям всей группы изученных радионуклидов, исключая S^{35} .

4. Самые низкие коэффициенты накопления характерны для S^{35} ; наиболее высокие — для P^{32} и редкоземельных элементов — Y^{91} , Pg^{143} и Ce^{144} ; промежуточное положение занимают Sr^{90} и Cs^{137} .

5. В процессе детритообразования (при отмирании цистозир) накопленный Sr^{90} возвращается в водную среду, тогда как Cs^{137} и Ce^{144} полностью переходят в органические остатки, которые обладают способностью к дополнительной адсорбции этих элементов из раствора.

6. Коэффициенты накопления S^{35} , Sr^{90} и Cs^{137} в морских организмах на порядок величин ниже коэффициентов накопления данных элементов в соответствующих группах пресноводных организмов (зеленые водоросли, цветковые растения, пластинчатожаберные моллюски). Коэффициенты накопления Y^{91} и Ce^{144} заметно не отличаются в этих двух случаях. Способность бурых водорослей накапливать Sr^{90} сравнима с таковой пресноводных зеленых водорослей и цветковых растений.

7. На основании обсуждения вероятных депо в море для различных радионуклидов, расчета сравнительной биологической опасности изучавшихся излучателей и новейшего океанографического материала об интенсивной вертикальной циркуляции вод Черного моря можно сделать заключение о несоответствии Черного моря требованиям, предъявляемым к международному пункту по захоронению и обезвреживанию высокоактивных отходов атомной промышленности.

ЛИТЕРАТУРА

- А кам син А. Д., Парчевский В. П. и Поликарпов Г. Г. 1960. Радиоактивность некоторых представителей планктона, бентоса и нектона.— Труды Севаст. биол. станции, т. XIII.
- Б ог да но ва А. К. 1960. Водобмен через Босфор и его роль в перемешивании вод Черного моря.— Труды Севаст. биол. станции, т. XII.
- Б о го ро в В. Г. и К ре п с Е. М. 1958. Возможно ли захоронение радиоактивных отходов в глубоководных впадинах океана?— Природа, № 9.
- В е р на д ский В. И. 1940. Биогеохимические очерки. Изд-во АН СССР.
- В и но гра до в А. П. 1933. Геохимия живого вещества. Изд-во АН СССР.
- В о дя ни цкий В. А. 1958. Допустим ли сброс отходов атомных производств в Черное море?— Природа, № 2.
- Г е де о но в Л. И. 1957. Радиоактивное загрязнение атмосферы.— Атомная энергия, № 3.
- Г е ц о ва А. Б. 1960. К вопросу о выведении радиоактивных изотопов у некоторых представителей водных беспозвоночных.— Докл. АН СССР, т. 133, № 2.
- Ж а д ин В. И., Кузнецов С. И. и Тимофеев-Ресовский Н. В. 1959. Радиоактивные изотопы в решении проблем гидробиологии.— Труды Второй Межд. конференции по мирному использованию атомной энергии. Получение и применение изотопов. М.
- К ре п с Е. М. 1959. Проблема радиоактивной загрязненности океанов и морских организмов.— Изв. АН СССР, серия биол., № 3.
- П о ве ля гина З. С. и Телитченко М. М. 1959. Концентрация радиоактивных изотопов фосфора и стронция разными видами пресноводных моллюсков.— Бюлл. МОИП, отд. биол., т. 54, № 2.
- П о л и к а р п о в Г. Г. 1958. Накопление радиоизотопа церия пресноводными моллюсками.— Природа, № 5.
- П о л и к а р п о в Г. Г. 1960а. Радиоактивные изотопы и ионизирующие излучения в морской биологии.— Труды Севаст. биол. станции, т. XIII.
- П о л и к а р п о в Г. Г. 1960б. Поглощение радиоактивности морскими организмами.— Природа, № 1.
- П о л и к а р п о в Г. Г. 1960в. О накоплении осколочных радиоизотопов морскими организмами. I. Аккумуляция бентосными растениями и животными стронция-90, иттрия-91 и церия-144.— Научн. докл. высш. школы биол. науки, № 3.
- П о л и к а р п о в Г. Г. 1960г. Роль морских организмов в миграции сульфатов и сульфидов.— Там же, № 4.
- П о л и к а р п о в Г. Г. 1960д. К изучению фосфорного питания *Ulva rigida* методом меченых атомов.— Труды Севаст. биол. станции, т. XIII.
- П о л и к а р п о в Г. Г. 1961. Роль детритообразования в миграции стронция-90, цезия-137 и церия-144.— Докл. АН СССР, т. 136, № 4.
- С е м е но в Д. И. 1958. Применение комплексонов в биологии и медицине.— Труды совещ. по комплексонам. УФ АН СССР. Свердловск.

- Скопинцев Б. А. 1959. Особенности содержания и распределения солей в водах Черного моря.— Природа, № 12.
- Спицын В. И. и Колычев Б. С. 1960. Итоги международной монакской конференции по переработке и захоронению радиоактивных отходов.— Атомная энергия, т. 9, № 1.
- Тимофеев-Ресовский Н. В. 1957. Применение излучений и излучателей в экспериментальной биогеоценологии.— Бот. журн., т. 42, № 2.
- Тимофеев-Ресовский Н. В., Порядкова Н. А., Сокурова Е. Н. и Тимофеева-Ресовская Е. А. 1957. Работы по экспериментальной биогеоценологии. I. Влияние излучателей на биомассу и структуру наземных, почвенных и пресноводных биоценозов.— Сб. работ лабор. биофизики УФ АН СССР, вып. 1.
- Тимофеев-Ресовский Н. В. и Тимофеева-Ресовская Е. А. 1959. Распределение излучателей в водоемах.— Совещ. по вопросам эксплуатации Камского водохранилища, Пермь.
- Тимофеев-Ресовский Н. В., Тимофеева-Ресовская Е. А., Милютина Г. А. и Гецова А. Б. 1960. Коэффициенты накопления пресноводными организмами радиоактивных изотопов 16 различных элементов и влияние комплекса ЭДТА на некоторые из них.— Докл. АН СССР, т. 132, № 5.
- Тимофеева-Ресовская Е. А., Агафонов Б. М. и Тимофеев-Ресовский Н. В. 1958. О почвенно-биологической дезактивации.— Юбилейн. сб. УФ АН СССР. Свердловск.
- Тимофеева-Ресовская Е. А., Попова Э. И. и Поликарпов Г. Г. 1958. О накоплении пресноводными организмами химических элементов из водных растворов. I. Концентрация радиоактивных изотопов фосфора, цинка, стронция, рутения, цезия и церия разными видами пресноводных моллюсков.— Бюлл. МОИП, отд. биол., т. 63, вып. 3.
- Тимофеева-Ресовская Е. А. и Тимофеев-Ресовский Н. В. 1958. О накоплении пресноводными организмами химических элементов из водных растворов. II. О коэффициентах накопления различных радиоизотопов прудовиком *Limnaea stagnalis*.— Бюлл. МОИП, отд. биол., т. 63, вып. 5.
- Тимофеева-Ресовская Е. А., Тимофеева Н. А. и Тимофеев-Ресовский Н. В. 1959. О накоплении пресноводными организмами химических элементов из водных растворов. III. О коэффициентах накопления различных радиоизотопов тремя видами водных растений.— Бюлл. МОИП, отд. биол., т. 64, вып. 5.
- Шведов В. П., Блинов В. А., Гедеонов Л. И. и Анкудинов Е. П. 1958. Радиоактивные выпадения в окрестностях Ленинграда.— Атомная энергия, т. 5, вып. 5.
- Borroughs H., Chipman W. A. and Rice T. R. 1957. Laboratory experiments on the uptake, accumulation, and loss of radionuclides by marine organisms. The effects of atomic radiation on oceanography and fisheries.— Publ. N 551, Washington.
- Dunster H. I. 1958. The disposal of radioactive liquid wastes into coastal waters.— 2nd Un. Natl. Int. Conference on the Peaceful Use of Atomic Energy.— Publ. N 297.
- DuShane G. 1959. Nuclear ships.— Science, v. 127, N 3310.
- The effects of atomic radiation on oceanography and fisheries. The biological effects of atomic radiation. Report of the Committee on effects of atomic radiation on oceanography and fisheries of the Natl. Acad. of Sci., Publ. N 551, Washington, 1957.
- Libby W. F. 1956. Radioactive fallout.— Proc. Natl. Acad. Sci. USA., v. 43, N 8.
- Polikarpov G. G. 1961. Ability of some Black Sea organisms to accumulate fission products.— Science, v. 133, N 3459.
- Revelle R. and Schaefer M. B. 1958. Oceanic research needed for safe disposal of radioactive wastes at sea.— Rubl., N 2431.
- Spooner G. M. 1949. Observations on the absorption of radioactive strontium and yttrium by marine algae.— J. Mar. Biol. Ass., v. 28, N 3.
- Oceanography, fisheries and atomic radiation.— Science, v. 124, N 3210, 1956.
- Webb D. A. 1937. Studies on the ultimate composition on biological material. 2. Spectrographic analyses of marine invertebrates, with special reference to chemical composition of their environment.— Sci. Proc. Roy. Dublin Soc., v. 21.
- Wilson S. H. and Fieldes M. 1941. Studies in spectrographic analyses. II. Minor elements in a sea-weed (*Macrocystis pyrifera*).— New Zealand J. Sci. Techn., v. 23, N 2B.
- Wiseman J. D. H. 1955. Marine organisms and biogeochemistry.— Nature, v. 176, N 4487.