

О. С. Зудин, Б. А. Нелепо

**Статистический анализ
информации
о радиоактивном
загрязнении
океана**



О. С. Зудин, Б. А. Нелепо

Статистический анализ
информации
о радиоактивном
загрязнении
океана

Дается анализ загрязненности Мирового океана радиоактивностью за счет различных источников, приведена их классификация. Разработана методика анализа и определения радиоактивности по ограниченной информации. Даны практические рекомендации для планирования исследований случайных ядерно-гидрофизических полей в океане. Проведен качественный и количественный анализ загрязненности вод Атлантического и Тихого океанов искусственной радиоактивностью; приведены карты распределения концентраций радиоактивности.

Представляет интерес для лиц, занимающихся изучением загрязненности Мирового океана и прикладными вопросами, связанными с океанографическими исследованиями. Может быть использована в качестве учебного пособия по специальностям, связанным с изучением морей и океанов.

The analysis of the ocean radiative pollution by different sources is presented and the classification of such sources is given. The methods of analysis and determination of radioactivity with the help of limited data are developed. Practical recommendations for planning of research works in the field of random nuclear-geophysics fields in the ocean. Quantitative and qualitative analysis of the Atlantic and Pacific Ocean pollution by artificial radioactivity is done, the maps of radioactive concentrations distributions are constructed.

The book may be of interest for researchers in the field of ocean pollution and applied questions of oceanographic research. Can be also used as a text-book for specialities connected with study of oceans and seas.

Олег Сергеевич Зудин
Борис Алексеевич Нелепо

Статистический анализ информации о радиоактивном загрязнении океана

Редактор Ю. П. Бреховских. Художник Ю. Н. Васильев. Худ. редактор Б. А. Денисовский. Техн. редактор Л. М. Шишкова. Корректоры: Г. Н. Римант, А. В. Хюркес

Сдано в набор 10/II 1975 г. Подписано к печати 14/V 1975 г. М-17186. Формат 60×90¹/₁₆. Бумага тип. № 1. Печ. л. 7. Уч.-изд. л. 7,61. Тираж 1500 экз. Индекс ОЛ-59. Заказ № 112. Цена 50 коп.

Гидрометеоиздат, 199053. Ленинград. 2-я линия, д. 23.
Ленинградская типография № 8 Союзполиграфпрома при Государственном комитете Совета Министров СССР по делам издательств, полиграфии и книжной торговли.
190000. Ленинград, Прачечный пер., д. 6

ПРЕДИСЛОВИЕ

Имеющиеся представления о характеристиках вод Мирового океана и причинах их формирования, о переносе и их трансформации крайне ограничены. Вместе с тем исследователю для анализа всего того многообразия конкретных свойств вод, для понимания их структуры и динамики, которые встречаются в реальных условиях, необходимо знать пороговые уровни изучаемых параметров, распределение сбросов в океан, круговорот вещества и энергии, интенсивности выпадений и другие особенности природы океанов и морей.

Для анализа состояния поверхностных вод океана важно, например, знать развитие процессов, обусловленных активным взаимодействием с атмосферой.

Поэтому в связи с расширением экспериментальных исследований водных масс Мирового океана, а также развитием вычислительной техники в настоящее время широко используются прикладные методы статистического анализа (обработки) различного вида информации, включая ядерно- и гидрофизическую информацию. Но чтобы построить конкретный алгоритм обработки и интерпретации собираемой информации, необходимо с максимальной полнотой формализовать априорные представления о связи поля с объектом исследования и определить план поиска ожидаемых закономерностей распределения. В этом случае оказывается рациональным ограничить область исследований, выбрав модель, позволяющую исследовать ситуацию, выделив для этих целей ряд параметров или каких-либо функций от них, сохранив при этом всю информацию об изучаемом явлении. Модель подобного факторного анализа может явиться достаточно хорошим приближением ко многим реальным ситуациям и позволит исследовать внутреннюю структуру матриц корреляций и ковариаций концентраций радионуклидов.

Известно, что в силу ряда причин потоки глобальных радиоактивных выпадений на различные участки поверхности земного шара существенно колеблются как в пространстве, так и во времени. Вследствие этого распределение концентрации радионуклидов на единице площади различных районов суши и поверхностных вод океанов неодинаково. Однако если на суше распределение радиоактивности зависит только от потока выпадений, то в океане из-за наличия интенсивных процессов перемешивания и адвекции эта связь может быть нарушена. Удаление радиоактивных отходов атомных производств в водную среду еще более усиливает неопределенность связи.

Между тем при исследовании крупномасштабных процессов в Мировом океане необходимо располагать данными о характерных зонах концентрации радионуклидов. Таким образом, одним из важных направлений исследования океана является изучение его радиоактивности.

В этой ситуации существенным может оказаться анализ оценок статистических параметров отдельных факторов и определение их влияния на результаты интерпретации данных эксперимента.

Выбираемые сетки наблюдений (план проведения эксперимента) должны существенно зависеть от ожидаемых качественных состояний поля (от детерминированной составляющей) и свойств случайной компоненты (ее корреляционной матрицы), а также от числа, физического смысла и ожидаемых значений проб концентраций.

Данная книга является обобщением практической работы авторов в области статистического анализа ядерно-гидрофизических полей на акваториях океанов.

Авторы чрезвычайно признательны д-ру физ.-мат. наук Е. П. Борисенкову, канд. физ.-мат. наук Л. И. Геденову, канд. техн. наук С. А. Редкозубову за ценные рекомендации и за обсуждение отдельных разделов данной книги.

Глава 1

ИСКУССТВЕННАЯ РАДИОАКТИВНОСТЬ В МОРЯХ И ОКЕАНАХ

Источники радиоактивного загрязнения

Многие проблемы, возникающие при анализе полей радиоактивности в океане, могут быть решены только в тех случаях, когда известен характер источников загрязнения окружающей среды осколками деления. В зависимости от природы эти источники подразделяются на следующие: 1) продукты испытаний ядерного и термоядерного оружия; 2) радиоактивные отходы атомных производств и электростанций; 3) отходы атомного флота.

Как известно, к началу 1969 г. было произведено около 470 ядерных взрывов, причем большая их часть — в период с 1945 г. до подписания в 1963 г. Московского договора о частичном прекращении испытаний атомного оружия. К этому времени общая мощность взрывов достигла 194 мегатонн, что соответствует делению $2,8 \times 10^{28}$ атомов урана или плутония [123]. Испытания проводились в различных условиях, создававших специфику радиоактивного загрязнения в каждом конкретном случае. Общая их характеристика приведена в табл. 1.

Таким образом, в окружающую среду попало около 21 МКи Sr^{90} и 34 МКи Cs^{137} . Хотя после 1963 г. основные ядерные державы прекратили все испытания, кроме подземных, выброс в атмосферу осколочных продуктов деления продолжается в результате деятельности неприсоединившихся стран (КНР, Франция).

Конечно, этот процесс приводит к радиоактивному загрязнению Мирового океана не только Cs^{137} и Sr^{90} . Полный перечень образующихся радионуклидов может быть получен из таблиц, учитывающих реальный выход осколков деления при ядерных взрывах. Однако два изотопа исследовались особенно интенсивно. Естественно, что именно они и дают наибольшую информацию. Таблица 2

позволяет судить об изученности к 1971 г. радиоактивности Мирового океана.

Таблица 1

Мощность ядерных взрывов, произведенных в 1945—1968 гг. Мт [123]

Место взрыва	Континент	Коралловые острова	Океан
Поверхность	58	16	—
Башня	45	11	—
Атмосфера			
0,3—29 км	47	48	1
47—480 км	4	—	10
Подводные	—	3	2
На борту судна	—	35	—
Подземные	116	—	—

Таблица 2

Изученность искусственной радиоактивности Мирового океана

Число публикаций							
>120	>60	>20	>10	>5	3	2	1
Sr ⁹⁰	Cs ¹³⁷	Ce ¹⁴⁴	C ¹⁴ Zr ⁹⁵ Ru ¹⁰⁶	H ³ Ru ¹⁰³	Cr ⁵¹ Mn ⁵⁴ Sr ⁸⁹ Sb ¹²⁵ Ce ¹⁴¹	Co ⁶⁰ Zn ⁶⁵ Y ⁹¹ Pu ²³⁹ Pu ²⁴⁰	P ³² Sc ⁴⁶ Kr ⁸⁵ Ag ^{110m} I ¹³¹ Ba ¹⁴⁰ Eu ¹⁵⁵

Распространение осколков деления в атмосфере после взрывов и особенно глобальные радиоактивные выпадения являются объектом исследований нового раздела физики атмосферы — ядерной метеорологии [45, 54, 79, 80]. Наиболее важная для ядерной гидрофизики информация, полученная из работ по ядерной метеорологии, связана с возможностью получить пространственные и временные характеристики этого важного источника радиоактивного загрязнения. Необходимо отметить, что в зависимости от расположения испытательных полигонов различные океаны испытывают специфическое влияние источников осколочной продукции. Так, Атлантический и Индийский океаны, не имевшие испытательных полигонов, загрязнялись радиоактивностью в полном соответствии с глобальными закономерностями. Отличается характером загрязнений Тихий океан, поскольку в нем существовали локальные источники радиоактивности (испытательные полигоны). Один из них — испытательный полигон Франции на атолле Муруроа — функционирует и в настоящее время. Роль полигона была иссле-

дована в результате экспедиции на НИС «Михаил Ломоносов» в 1967 г. [11].

Хорошо известной особенностью глобальных выпадений, имеющей важное значение для ядерной гидрофизики, является широтный эффект, приводящий к неравномерному загрязнению Мирового океана на различных широтах (рис. 1). Изменение мощности глобальных выпадений во времени изучалось многими авторами. Используя многоящичную модель очистки атмосферы, учитывающую коагуляцию естественных и искусственных аэрозолей, авторам удалось получить, по-видимому, близкое к адекватному описание запаса Sr^{90} , находящегося в атмосфере:

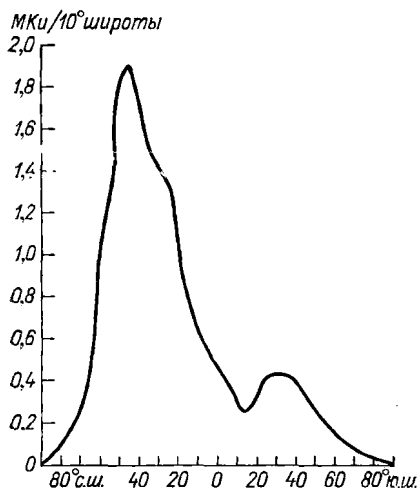


Рис. 1. Широтное распределение Sr^{90} в 1958—1967 гг.

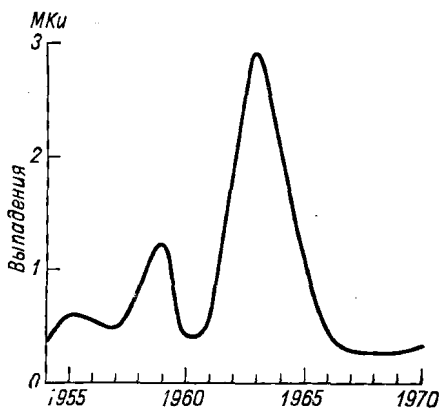


Рис. 2. Глобальные радиоактивные выпадения Sr^{90} .

полярные полигоны

$$H(t) = \sum_i e^{-\lambda_{\text{Sr}} t_i} (n_0)_i \left[X_1 e^{-v_1 t_i} \sqrt{1 - e^{-\lambda_k t_i}} + e^{-v_2 t_i} \sqrt{1 - e^{-\lambda_k t_i}} - X_1 e^{-(v_1 + v_2) t_i} \sqrt{1 - e^{-\lambda_k t_i}} \right];$$

экваториальные полигоны

$$H(t) = \sum_i e^{-\lambda_{\text{Sr}} t_i} (n_0)_i \left[X_1 e^{-v_1 t_i} \sqrt{1 - e^{-\lambda_k t_i}} + (X_1 + X_2) e^{-v_2 t_i} \sqrt{1 - e^{-\lambda_k t_i}} - X_1 e^{-(v_1 + v_2) t_i} \sqrt{1 - e^{-\lambda_k t_i}} + (X_2 + X_3) e^{-v_3 t_i} \sqrt{1 - e^{-\lambda_k t_i}} - (X_1 + X_2) e^{-(v_2 + v_3) t_i} \sqrt{1 - e^{-\lambda_k t_i}} - X_1 e^{-(v_1 + v_2 + v_3) t_i} \sqrt{1 - e^{-\lambda_k t_i}} \right],$$

где $H(t)$ — запас Sr^{90} в атмосфере; $(n_0)_i$ — выход Sr^{90} при i -том

испытательном взрыве или серии; λ_{Sr} — постоянная распада Sr^{90} ($\frac{1}{40}$ лет⁻¹); $X_{1,2,3}$ — коэффициенты выхода первичной осколочной продукции в соответствующий резервуар модели; $v_{1,2,3}$ — постоянные очистки соответствующих резервуаров модели; λ_h — постоянная полукоагуляции естественных и радиоактивных аэрозолей в атмосфере; t_i [лет] — время, прошедшее от момента проведения i -той серии до момента, для которого определяется общий запас.

Дифференциал от величины $H(t)$ определяет значение потока глобальных выпадений. Рисунок 2, полученный в результате анализа данных [61], дает представление о характере его изменения со временем.

Помимо стронция-90 и цезия-137, присутствующих в атмосфере в аэрозольном состоянии, в результате испытаний ядерного оружия образовались также радиоактивные газы — тритий и радиоуглерод. Их содержание по сравнению со стронцием и цезием приведено в табл. 3.

Таблица 3

Содержание (МКи) некоторых долгоживущих изотопов, образовавшихся в атмосфере в результате испытаний ядерного оружия до 1963 г. [79]

Изотоп	Общая продукция, МКи	Тропосфера	Стратосфера			
			северное полушарие		южное полушарие	
			до 23 км	23—33 км	до 23 км	23—33 км
Sr^{90}	14,8	0,32	4,51	1,21	0,42	0,10
Cs^{137}	32,5	0,55	7,69	2,06	0,72	0,17
C^{14}	10,1	2,7	1,7	0,66	0,31	0,14
H^3	2000	Мало	340	130	62	28

Необходимо иметь в виду, что радиоуглерод и тритий образуются и в результате взаимодействия космических лучей с ядрами воздуха. Концентрации этих радиоактивных газов, генерируемых естественным образом, приведены в табл. 4.

Среди прочих радиоактивных газов техногенного происхождения необходимо также отметить криптон-85, рост содержания которого в атмосфере не прекращается в связи с увеличением количества атомных электростанций. Его концентрация в атмосфере находится, по-видимому, на уровне 10^{-12} — 10^{-11} Ки/м³ [80]. При взрывах определенных типов термоядерных устройств (в 1962 г.) в атмосферу попали также продукты активации конструкционных материалов этих устройств. Так, после 1963 г. многими исследователями в радиоактивных выпадениях обнаруживался марганец-54 [45].

Второй источник радиоактивного загрязнения Мирового океана — сброс отходов атомных предприятий — приобретает в по-

следние годы все большее значение. Это происходит потому, что глобальные выпадения уменьшились, а мощные заводы по переработке ядерного горючего, обеспечивающие работу атомных электростанций, дают возрастающее количество радиоактивных отходов. Хотя большая доля этих отходов подвергается захоронению на суше, некоторые страны все же практикуют их сброс в моря и океаны. Анализу этой проблемы был посвящен ряд работ [52, 53, 123].

Таблица 4
Концентрация радиоактивных продуктов
в приземном воздухе [75]

Изотоп	Концентрация, Ки/м ³
C ¹⁴	5 · 10 ⁻¹³
Be ⁷	(2 + 32) · 10 ⁻¹⁴
H ³	~ 10 ⁻¹³ + 10 ⁻¹⁶
S ³⁵	~ 10 ⁻¹⁵
P ³²	2 · 10 ⁻¹⁶
P ³³	5 · 10 ⁻¹⁶
Na ²²	~ 10 ⁻¹⁷

Вкратце проблема сводится к следующему. В течение многих лет радиоактивные отходы попадали в океан тремя путями: при захоронении на больших глубинах контейнеров, при непосредственном сбросе радиоактивности в прибрежные воды и при выносе крупными реками, являющимися коллекторами для отходов атомных производств.

Таблица 5 суммирует известные данные [123] о захоронении радиоактивности на дне океана. Пока нет сведений об утечках и повышенной радиации в местах захоронения. Однако позднее, при анализе ситуаций, когда в океане будут обнаруживаться аномально-высокие концентрации осколочных продуктов, эти сведения могут оказаться полезными.

Наиболее интенсивный слив радиоактивных отходов в прибрежные воды производила с 1957 г. Великобритания. В табл. 6 суммированы данные об этих сливах вплоть до 1967 г.

Естественно, что все крупные реки, впадающие в океан, являются коллекторами искусственной радиоактивности. Часть из них несет определенную долю осколков, появившихся на поверхности суши в результате глобальных выпадений. Некоторые реки загрязняют океаны осколочной продукцией значительно сильнее других; это, в частности, реки, используемые для сброса слабой активности от промышленных ядерных установок. В США в первую очередь следует отметить р. Колумбию, которая принимает в свои воды отходы Ханфордского атомного комплекса Клинч и Теннесси (центр в Ок-Ридже). Во Франции значительному радиоактивному загрязнению подвергается р. Рона, принимающая отходы Маркульского атомного центра.

Таблица 5

Контейнерные захоронения радиоактивных отходов в глубинах океана [123]

Период	Страна	Район захоронения	Примерная активность, Ки	
Атлантический океан				
1951—1958	США	42° 25' с., 70° 35' з.	2 440	
		36 56 74 23	6,5	
		37 50 70 35	8 000	
		38 30 72 06		
1959—1960		38 30 72 06	68 500	
		36 44 45 00	456	
		36 50 74 23	24,5	
		36 56 74 23	15,6	
1961—1962		36 56 74 23	5,3	
1963—1964		36 56 74 23	4,3	
1965	36 56 74 23	30,5		
1967	36 56 74 23			
Тихий океан				
1946—1958		37° 39' с., 123° 26' з.	14 061	
1959—1960		37 39 123 26	155,7	
		32 00 121 30	3,6	
		34 58 174 52	14	
1961—1962		32 00 121 30	30	
		37 39 123 26	235,1	
		33 39 119 28	47,9	
1963—1964		40 07 135 24		
		54 10 141 09	7,2	
		37 39 123 26	16,1	
1966	40 07 135 24	88,7 (Н ³)		
	54 10 141 09			
	37 12 123 55	15,4 (Н ³)		
Атлантический океан				
1951	Англия	34° 00' с., 20° 00' з.	0,5 (α)	5 (β)
1953		34 00 20 00	2,5	3
1955		34 00 20 00	12	33
1957		34 00 20 00	955	808
1958		34 00 20 00	695	1 085
1961		34 00 20 00	563	1 630
1962		40 20 13 53	} 17	163
		47 56 13 27		
		48 43 13 05		
		48 19 13 29		
1963	48 19 13 29	368 (α)	7 071 (β)	
1964	48 19 13 29	444	15 090	
1965	48 19 13 29	114	13 754	
1966	48 19 13 29	78	2 742	
1967	42 00 14 00	91	1 682	
	ФРГ	42 00 14 00	0,5	5
	Голландия	42 00 14 00	—	2
	Бельгия	42 00 14 00	—	190
	Франция	42 00 14 00	1	10

Таблица 6

Средние темпы сброса радиоактивных отходов в Ирландском море в 1957—1967 гг., Ки/мес. [123]

Радионуклид	1957	1958	1959	1960	1961	1962	1963	1964	1965	1966	1967
Ru ¹⁰⁶	2,218	3,522	2,956	3,302	2,095	1,916	2,781	1,924	1,752	2,077	1,436
Ru ¹⁰³	300	492	746	964	265	153	800	100	150	205	186
Sr ⁹⁰	137	210	129	43	41	85	46	81	97	76	116
Sr ⁸⁹	248	72	170	82	114	42	14	16	14	7	12
Ce ¹⁴⁴	215	497	583	74	180	200	116	267	288	571	1,142
U ⁹¹ + редкоземельные элементы	300	567	506	83	201	125	90	90	73	75	203
Cs ¹³⁷	310	516	165	76	91	92	31	111	97	100	132
Sr ⁹⁵	59	210	415	196	140	78	47	1,797	1,479	1,172	1,566
Nb ⁹⁵	535	510	845	523	658	356	272	1,735	2,803	1,947	2,143
Всего											
β	5,366	6,846	7,659	6,461	3,981	3,742	4,020	5,055	4,560	5,464	6,022
α	4,8	5,2	5,6	6,8	11,1	15,5	19,0	23,5	33,8	48,8	79,6

Таблица 7 дает представление о радиоактивных отходах, выносившихся р. Колумбией в Тихий океан.

Таблица 7

Вынос отходов Ханфордского атомного комплекса в Тихий океан [123]

Год	Бета-излучение	P^{32}	Cr^{51}	Zn^{65}	Np^{239}
1950	2 500	—	—	—	—
1951	3 600	—	—	—	—
1952	7 100	—	—	—	—
1955	13 000	—	—	—	—
1956	17 000	—	—	—	—
1957	37 000	—	—	—	—
1958	44 000	—	—	—	—
1959	110 000	—	—	—	—
1960	93 000	6 200	310 000	14 000	26 000
1961	—	11 000	310 000	16 000	24 000
1962	—	4 700	240 000	11 000	11 000
1963	—	4 400	320 000	10 000	18 000
1964	—	4 400	320 000	16 000	—
1965	—	4 000	290 000	18 000	—
1966	—	3 300	160 000	8 000	—
1967	—	4 400	224 000	15 000	—

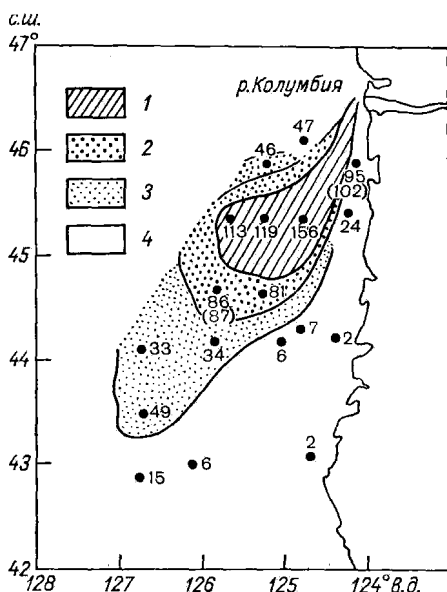


Рис. 3. Распространение в Тихом океане радионуклида Cr^{51} , сбрасываемого в воды р. Колумбии.

1 — >100 отн. ед., 2 — 50—100, 3 — 25—100, 4 — < 25.

Обращает на себя внимание вынос огромных количеств Cr^{51} . Это не могло не сказаться на радиационной обстановке в данном регионе. Гигантские ареалы, образовавшиеся в результате дисперсии радионуклида в океане, были обнаружены американскими исследователями в 1965 г. (рис. 3). Несмотря на то что в табл. 7 не приводятся сведения о сбросе таких радионуклидов, как Cs^{137} и Sr^{90} , исследователи систематически обнаруживали их повышенное содержание в водах региона.

Завершая краткую характеристику источников радиоактивного загрязнения океанов, необходимо остановиться на деятельности атомоходного флота. Выделение этого вида загрязнений казалось нам необходимым в связи с тем, что с точки зрения ядерной гид-

рофизики перемещения в океане атомных подводных лодок и надводных судов могут рассматриваться как случайные. Поэтому трудно ожидать, что, подобно глобальным выпадениям и сбросам отходов производств, в данном случае окажется возможным точно судить о дисперсии загрязнений в океанах. Представляется, что эти стохастические события уже были причиной неожиданных аномалий искусственной радиоактивности в океане. Согласно опубликованным данным [123], во всем мире плавало и строилось в 1968 г. более 160 атомных подводных лодок. Особенностью энергетических установок атомных подводных лодок является закономерный сброс охлаждающих вод, объем которых увеличивается при выведении реактора на рабочую мощность. В каждом таком цикле выделяется около 2 т охладителя. Эта операция часто повторяется при интенсивной эксплуатации лодок. Ясно, что загрязнение радиоактивными изотопами прибрежных акваторий и открытого океана может быть значительным. Таблица 8 дает представление об изотопном составе и концентрациях радиоактивных изотопов в охладителе атомной подводной лодки [123].

Таблица 8

Радиоактивность охлаждающей воды энергетической установки атомной подводной лодки «Наутилус», МКи/мл [123]

Продукт коррозии	Средняя активность	Продукт деления	Средняя активность
F ¹⁸	$1,5 \cdot 10^{-2}$	Y ⁸⁹	$5,0 \cdot 10^{-6}$
Ni ²⁴	$2,2 \cdot 10^{-4}$	Y ⁹⁰	$5,0 \cdot 10^{-8}$
Cr ⁵¹	$3,7 \cdot 10^{-4}$	I ¹³¹	$1,0 \cdot 10^{-5}$
Mn ⁵⁶	$2,1 \cdot 10^{-2}$	B ¹⁴⁰	$1,0 \cdot 10^{-6}$
Fe ⁵⁹	$5,1 \cdot 10^{-4}$	Cs ¹³⁷	$1,0 \cdot 10^{-8}$
Co ⁶⁰	$3,2 \cdot 10^{-3}$	Ce ¹⁴⁴	$1,0 \cdot 10^{-7}$
Cu ⁶⁴	$1,0 \cdot 10^{-3}$		
Ni ⁶⁵	$5,7 \cdot 10^{-4}$		
Ta ¹⁸²	$4,5 \cdot 10^{-3}$		
W ¹⁸⁷	$1,5 \cdot 10^{-3}$		

Глобальные закономерности распределения радиоактивности в океанах

Естественное желание рассматривать закономерности формирования поля радиоактивности в морях и океанах в зависимости от характера действия атмосферных источников привело к попыткам обнаружить, аналогично атмосфере, широтный эффект распределения искусственной радиоактивности на поверхности океанов. Между тем, если для атмосферы еще могут быть применены представления о циркуляции, имеющей чисто меридиональный характер, то в океане проблема представляется значительно более сложной. Распределение радиоактивности является здесь

результатом действия ряда конкурирующих процессов. Широкий эффект глобальных выпадений определяет потоки радиоактивности на поверхности океана. Однако выпавшие радиоизотопы попадают в состав водных масс, довольно интенсивно перемешиваемых и

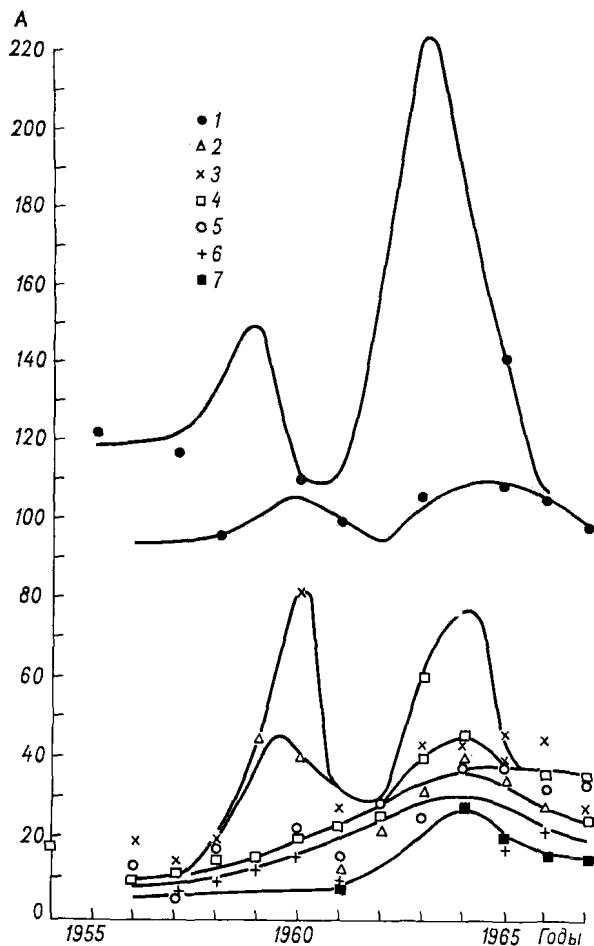


Рис. 4. Временный ход поверхностной радиоактивности расп/(мин · 100 л) на различных широтах (сев.) Атлантического океана.

1 — 60—70°, 2 — 50—60°, 3 — 40—50°, 4 — 30—40°, 5 — 20—30°, 6 — 10—20°, 7 — 0—10°.

участвующих в глобальной океанической циркуляции. Поэтому исследования широтного эффекта радиоактивности на поверхности океана имеют скорее качественный характер, и результаты таких исследований нуждаются в специальном анализе с учетом реальных гидрофизических процессов, происходящих в тех или иных районах.

Необходимо также иметь в виду, что Атлантический, Тихий и Индийский океаны по-разному загрязняются осколочной радиоактивностью. Так, в Атлантическом океане не было полигонов для испытаний ядерного оружия; таким образом, его акватория загрязнялась в основном в результате глобальных выпадений, исключая районы сброса отходов Великобританией. В Тихом океане до настоящего времени продолжает действовать полигон, расположенный на атолле Муруроа. До 1963 г. США провели много испытаний на атоллах в центральной части океана (Бикини, Эниветок). Здесь проводились испытания ядерного оружия Великобритании (о. Рождества и др.). Помимо локальных и тропосферных

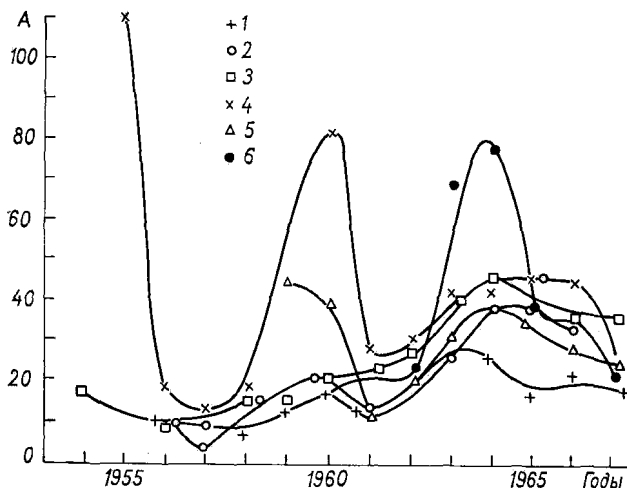


Рис. 5. Временной ход поверхностной радиоактивности расп/(мин · 100 л) на различных широтах (сев.) Тихого океана.

1 — 10—20°, 2 — 20—30°, 3 — 30—40°, 4 — 40—50°, 5 — 50—60°, 6 — 60—70°.

радиоактивных выпадений здесь также играют большую роль источники радиоактивности, связанные со сбросом и захоронением радиоактивных отходов. Индийский океан, по-видимому, наиболее однороден с точки зрения распределения радиоактивности, однако он исследован значительно хуже.

Используя осредненные широтные данные работы [123], мы попытались получить представление о связи широтного эффекта глобальных атмосферных выпадений с распределением по широте осколочной радиоактивности в Атлантическом и Тихом океанах. На рис. 4 даны распределения осколочной радиоактивности в период с 1957 по 1967 г. Обращает на себя внимание существенное различие временного хода радиоактивности на разных широтах. Разбросы значений настолько велики, что, по-видимому, трудно строить представление о широтном эффекте радиоактивности

в поверхностных водах. Скорее можно утверждать, что из-за значительного переноса водных масс на различных широтах по-разному проявляется результат суммарного действия двух конкурирующих процессов. Хотя поверхностную радиоактивность в первую очередь определяют глобальные выпадения, горизонтальная адвекция может существенно нивелировать поля радиоактивности на поверхности Мирового океана. На рис. 5 представлены результаты осреднения радиоактивности в поверхностных водах Тихого океана, которые демонстрируют его исключительность, связанную, по-видимому, с существованием местных источников аномалий поля радиоактивности. Эта особенность поля радиоактивности явилась одним из предметов проведенных исследований; в результате удалось обнаружить новые закономерности и выработать статистический критерий анализа радиоактивности различных регионов Мирового океана.

Соотношение цезия-137 и стронция-90 в океане

Изучению этого вопроса посвятили свои работы многие исследователи. Проблема представляется существенной, поскольку нельзя считать очевидно доказанным, что оба изотопа, имеющие различную химическую природу, могут одинаково вести себя в океане. Долгое время трудности возникали в связи с отсутствием методик одновременных измерений этих изотопов в пробах океанической воды. В то время, как было доказано, что отношение изотопов, выпадающих из атмосферы, составляет $\frac{34 \text{ Мг}}{21 \text{ Мг}} = 1,6$, оставалось не ясным, существует ли фракционирование этих изотопов в океане. Ответ на вопрос мог быть получен двумя путями — либо в результате определения физико-химического состояния изотопов в океане, либо обобщением массовых экспериментальных данных о содержании этих радиоизотопов в водах различных регионов Мирового океана. До настоящего времени не было осуществлено массовых определений форм существования Cs^{137} и Sr^{90} , и нам представлялось возможным использовать при анализе, наряду с опубликованными данными исследователей, изучавших это отношение, и свои собственные данные анализа указанного соотношения. В результате обобщения всей опубликованной к 1968 г. информации нам удалось получить значение этого отношения $1,6 \pm 0,1$ [61]. Последующие обобщения исследователей США [123] подтверждают эти результаты. Осреднение значительного количества весьма разнообразных данных позволило им получить величину $1,6 \pm 0,3$ для различных глубин Мирового океана и его морей. Эти цифры основаны на анализе 196 проб из Атлантического и 112 проб из Тихого океана. Большой разброс данных, подвергнутых анализу, явился причиной нашего специального исследования, осуществленного в результате проведения кругосветного плавания на НИС «Михаил Ломоносов», подтвердившего факт отсутствия фракционирования этих осколочных изотопов.