

УДК. 550.35.551.(268.45)

ОСОБЕННОСТИ РАСПРЕДЕЛЕНИЯ ^{238}U , ^{232}Th И ^{226}Ra В ДОННЫХ ОСАДКАХ ШЕЛЬФА И КОНТИНЕНТАЛЬНОГО СКЛОНА АРХИПЕЛАГА ШПИЦБЕРГЕН

© 2024 г. М. М. Доманов

Институт океанологии им. П. П. Шишова РАН, 117997, Москва, Нахимовский пр., д. 36
e-mail: domanov@ocean.ru

Получена 22.07.2023, после доработки 27.12.2023, принята к публикации 29.12.2023

Рассмотрены особенности распределения концентраций ^{238}U , ^{232}Th и ^{226}Ra в поверхностном слое донных осадков шельфа и континентального склона архипелага Шпицберген. Содержание ^{226}Ra , ^{232}Th и ^{238}U изменялось в интервале 22–134.3, 22.4–50.9 и 10.9–37.7 Бк/кг соответственно. Величина неравновесного с ураном-238 ^{226}Ra ($^{226}\text{Ra}_{\text{экс}}$) составляла от 23 до 73% от общего содержания ^{226}Ra в осадках. Максимальные концентрации ^{226}Ra , ^{238}U , ^{232}Th и $^{226}\text{Ra}_{\text{экс}}$ (134.3, 37.7, 50.9 и 98.2 Бк/кг соответственно) получены в районе повышенной биопродуктивности (Трог Орла). В этой зоне связь концентрации ^{226}Ra и $^{226}\text{Ra}_{\text{экс}}$ с содержанием в осадке органического вещества хорошо выражена, коэффициенты корреляции $R = 0.94$ и 0.92 соответственно, что указывает на существенный вклад биологического сообщества в накопление ^{226}Ra в донных осадках. Концентрация ^{226}Ra и значение величины эксцесса ^{226}Ra отрицательно связаны с величиной окислительно-восстановительного потенциала осадка ($R = -0.88$). Эта закономерность выполняется и в других районах акватории Шпицберген. В целом для всего массива наблюдений концентрации ^{238}U и ^{232}Th увеличиваются с ростом содержания в осадке органического углерода ($R = 0.72$ и 0.7 соответственно). Концентрации ^{238}U и ^{232}Th снижаются с увеличением содержания в осадке $\text{C}_{\text{карб}}$ ($R = -0.79$ и -0.81 соответственно). Полученные данные указывают на необходимость учета эксцесса ^{226}Ra при оценке общей естественной радиоактивности морских осадков, величина которого может превышать радиоактивность ^{238}U и ^{232}Th .

Ключевые слова: Баренцево море, донные осадки, радий, торий, уран

DOI: 10.31857/S0033831124010148

ВВЕДЕНИЕ

Архипелаг Шпицберген расположен в районе с резко изменяющимися гидрологическими, гидрохимическими и биологическими характеристиками среды. Акваторию пересекает полярный фронт с территорией повышенной биопродуктивности, в зоне влияния которой активизируются процессы седиментации. В формировании вещественного состава осадков существенную роль играет терригенный материал, поступающий с суши, а также приносимый течениями и дрейфующими льдами [1, 2].

Исследование распределения естественных радионуклидов в донных осадках акватории архипелага Шпицберген является одним из инструментов изучения геологической структуры этого региона. При этом информация о распределении естественных радионуклидов используется для расшифровки особенностей накопления поверхностных донных осадков.

Данные о распределении естественных радионуклидов ^{238}U , ^{232}Th и ^{40}K в слое осадков акватории архипелага Шпицберген были использованы для расчета радиогенной теплогенерации [3]. Связь концентрации ^{238}U , ^{232}Th в поверхностном слое осадков с содержанием органического углерода ($\text{C}_{\text{орг}}$)

и фракционным составом осадка в районе Шпицбергена и в Баренцевом море рассмотрена в работе [4]. Данные о распределении естественных радионуклидов ^{238}U , ^{232}Th и ^{40}K в осадках Баренцева моря и на шельфе Шпицбергена были обобщены в работе и использованы для оценки экогеохимической ситуации в Баренцевом море [5]. Распределение ^{40}K , ^{232}Th и ^{226}Ra с оценкой радиоэкологической ситуации в Баренцевом море изучено в работах [6, 7].

Вариации концентрации Th в поверхностных донных осадках норвежско-гренландского бассейна и их связь с минеральным и химическим составом осадков показаны в работе [8]. Измерения ^{226}Ra в придонном слое были использованы для доказательства обогащения придонного слоя ^{226}Ra , поступающим из донных осадков шельфа Гренландии и о. Ньюфаундленд [9].

Однако в опубликованных работах не рассматривались условия формирования поверхностного слоя осадков, приводящие к нарушению состояния радиоактивного равновесия в системе ^{238}U – ^{226}Ra , и не оценивалась величина эксцесса ^{226}Ra . Определение этого параметра, как было показано в работах [10, 11], позволяет получить более полную информацию о геохимических процессах преобразования осадков и механизме их образования.

Целью настоящей работы является определение концентрации ^{238}U , ^{232}Th и ^{226}Ra в донных осадках шельфа и континентального склона Шпицбергена и оценка эксцесса ^{226}Ra при нарушении радиоактивного равновесия в ряду ^{238}U – ^{230}Th – ^{226}Ra .

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ ЧАСТЬ

Материал для исследования, отобранный дночерпателем «Океан-0.25» из поверхностного слоя (0–5 см) донных осадков в районе Шпицбергена, был получен в 84-м рейсе НИС «Академик Мстислав Келдыш» (24 июля — 26 августа 2021 г.) [12]. Район работ и положение станций показаны на рис. 1.

Определение органического ($C_{\text{орг}}$) и неорганического ($C_{\text{карб}}$) углерода в осадках выполнено на анализаторе общего органического углерода TOC–L с блоком SSM-5000A фирмы Shimadzu. Химический анализ проб донных осадков выполнен методами атомной эмиссии (Plasmaquant-110, прибор укомплектован системой ультразвукового распыления пробы U-5000AT и системой генерирования гидридов Hydrid-/Hg-System BSH 960) для Al, Ba, Ca, Co, Cr, Cu, Fe, La, Mg, Mn, Nb, Ni, Sc, Sr, Ti, V, Y, Zn, Zr и масс-спектрометрии с индукционно связанной плазмой (Agilent 7500c) для Pb, Rb, As, Nd, Th, U. Точность метода определения — 5–10%. Измерения концентрации ^{226}Ra , ^{232}Th и ^{238}U в осадке выполнены в Центральной лаборатории радиационного контроля Национального исследовательского ядерного университета «МИФИ» с помощью гамма-спектрометра с детектором из сверхчистого германия GC-3020 с относительной эффективностью по линии кобальта-60 (1.332 МэВ), равной 30%, и разрешением по этой линии 1.8 кэВ. Применялся гамма-спектрометр с HPGe детектором ORTEC

GEM 30185 (стандартное, не низкофоновое исполнение), помещенным в низкофоновую защитную камеру. Конструкцию камеры и фоновые характеристики этого спектрометра см.: http://radiation.ru/research/HPGe_b.htm.

Использовали программное обеспечение GENIE-400 РС. После выдерживания пробы для установления радиоактивного равновесия ^{226}Ra определяли по дочернему продукту ^{214}Bi (энергия — 609 кэВ). Для измерения использовали сухие растертые пробы весом 26.3–32.4 г. Время экспозиции — 11–55 ч. Точность определения — ^{226}Ra 4–7, ^{232}Th 7–12, ^{238}U 5–10%. Спектры гамма-излучения образцов донных отложений анализировали в энергетическом диапазоне 50–3000 кэВ. В обработку включали все пики, найденные в указанной области спектра. При этом каждый пик рассматривали как композицию, образованную за счет наложения (интерференции) пиков, обусловленных регистраций нескольких линий гамма-излучения с близкими энергиями (пиков полного поглощения), пиков истинных и случайных совпадений и пиков утечки (пики одиночного и двойного вылета). В процессе обработки спектр рассматривали как единый объект, состоящий из набора гамма-линий конечного числа радионуклидов. Такой подход обеспечивает возможность корректно учитывать указанную выше интерференцию пиков в спектре.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

Концентрации ^{238}U , ^{232}Th и ^{226}Ra определяли в донных осадках шельфа, на континентальном склоне Шпицбергена и абиссальных глубинах. Результаты измерения концентраций радионуклидов представлены в табл. 1.

Содержание ^{226}Ra , ^{232}Th и ^{238}U изменялось в интервале 22–134.3, 22.4–50.9 и 10.9–37.7 Бк/кг соответственно. Максимальные концентрации ^{226}Ra , ^{238}U , ^{232}Th и эксцесса ^{226}Ra ($^{226}\text{Ra}_{\text{экс}}$) (134.3, 37.7, 50.9, 98.2 Бк/кг соответственно) получены в Троге Орла. Во всех изученных осадках поверхностный слой был окисленным (Eh от +65 до +140 мВ). Содержание органического ($C_{\text{орг}}$) и неорганического ($C_{\text{карб}}$) углерода, а также окислительно-восстановительный потенциал (Eh) в осадках были определены в работе [13] и приведены в табл. 2.

Содержание ^{226}Ra в осадке определяется суммой концентраций радия: ^{226}Ra , инкорпорированного в биогенные частицы, такие как карбонаты, опал, органическое вещество, равновесного с ураном радия, поступающего в осадки с терригенным материалом, где он находится в радиоактивном равновесии в ряду ^{238}U – ^{230}Th – ^{226}Ra , и $^{226}\text{Ra}_{\text{Io}}$, образованного при распаде ^{230}Th (иония). Содержание радия, образованного при распаде ^{230}Th ($^{226}\text{Ra}_{\text{Io}}$), в данной работе не рассчитывали. Однако для косвенной оценки величины $^{226}\text{Ra}_{\text{Io}}$ можно использовать уравнение регрессии ($R = -0.77$), полученное для морских осадков Антарктического шельфа и континентального склона в работе [11]:

$$^{226}\text{Ra}_{\text{Io}}/^{226}\text{Ra}_{\text{общ}} = -0.1539x + 0.7893,$$
 где x — скорость осадкообразования, см/1000 лет; $^{226}\text{Ra}_{\text{общ}}$ — измеренное содержание ^{226}Ra в осадке (Бк/кг).

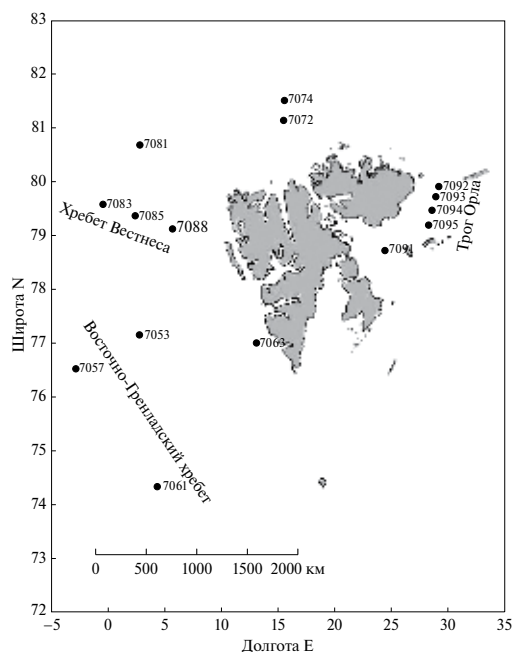


Рис. 1. Район работ и положение станций.

Скорости осадкообразования в районе северного континентального склона о. Шпицберген, измеренные в работе [14], составляют 3.9, 4.8 см/1000 лет (табл. 3). При этом доля $^{226}\text{Ra}_{\text{ю}}$ в величине $^{226}\text{Ra}_{\text{общ}}$ не превышает 5–19%. Скорости осадкообразования в других районах шельфа и континентального склона Шпицбергена еще больше (табл. 3), а доля радия, образованного из иония, в поверхностном слое осадка меньше и вклад $^{226}\text{Ra}_{\text{ю}}$ в общее содержание ^{226}Ra становится незначительным. Такой вывод подтверждается результатом модельных расчетов, выполненных в работе [20], где показано, что скорость осадконакопления в районе шельфа и континентального склона Шпицбергена составляет 5–100 см/1000 лет. При этом доля $^{226}\text{Ra}_{\text{ю}}$ в величине $^{226}\text{Ra}_{\text{общ}}$ не превышает 2%.

В Троге Орла, где величина эксцесса радия максимальна, скорость осадкообразования равна 22 см/1000 лет [19] в северной части Трога и 103 см/1000 лет — в южной [16].

Минимальное содержание органического углерода получено на станции 7053 на абиссальных глубинах Гренландского моря, а максимальное — в Троге Орла. Коэффициенты корреляции, характеризующие плотность связи концентрации радионуклидов в осадках с параметрами среды приведены в табл. 4.

В целом для всего массива наблюдений концентрации ^{238}U и ^{232}Th увеличиваются с ростом содержания в осадке органического углерода ($R = 0.72$ и 0.7 для ^{238}U и ^{232}Th соответственно). Концентрации ^{238}U и ^{232}Th снижаются с увеличением содержания в осадке $\text{C}_{\text{карб}}$ ($R = -0.79, -0.81$ соответственно). Величина эксцесса ^{226}Ra отрицательно коррелирует с Eh . С увеличением глубины концентрации ^{238}U и ^{232}Th снижаются ($R = -0.7$ и -0.63 соответственно).

На станциях с глубинами более 1200 м снижение концентрации ^{226}Ra , ^{238}U с глубиной более выражено ($R = -0.74, -0.75$) для ^{226}Ra , ^{238}U соответственно. В этом диапазоне глубин содержание ^{226}Ra снижается с ростом глубины в абиссальной части океана, что

Таблица 1. Концентрации радионуклидов (Бк/кг) в поверхностном слое осадка (5 см)

Район	Станция	Широта, °N	Долгота, °E	Глубина, м	^{226}Ra	^{238}U	^{232}Th	$^{226}\text{Ra}_{\text{экс}}$
ЮЗ континентальный склон Шпицбергена. Восточно-Гренландский хребет	7053	77.15	2.79	3055	22 ± 0.9	10.9 ± 1.51	22.4 ± 1.1	11.1 ± 3.9
	7057	76.53	-2.86	3626	28.9 ± 0.8	14.8 ± 1.3	26.5 ± 0.98	14.1 ± 3.3
	7061	74.33	4.43	3423	32 ± 0.9	15.3 ± 1.3	32.2 ± 1.0	16.7 ± 3.6
ЮЗ шельф Шпицбергена	7063	77	13.11	321	30 ± 1.1	15.6 ± 1.1	26.7 ± 2.2	14.4 ± 3.2
Средние					29.7	14.1	26.9	15.6
σ					4.3	2.2	4.0	2.3
Северный континентальный склон Шпицбергена	7072	81.14	15.54	2041	35.5 ± 1.3	25.5 ± 1.7	40.1 ± 1.3	10 ± 3.7
	7074	81.52	15.59	2503	32 ± 0.79	20.6 ± 1.26	32.7 ± 1.0	11.4 ± 2.7
Средние					33.8	23.0	36.	10.7
σ					1.8	3.5	5.2	1.0
$\text{Cv}, \%$					5.3	15.5	14.4	9.3
Северо-западный район Шпицбергена. Хребет Вестнеса	7081	80.68	2.84	1260	35.1 ± 1.1	22.7 ± 1.9	32.9 ± 0.99	12.5 ± 3.9
	7083	79.58	-0.43	2740	29 ± 1.0	21.4 ± 1.4	38.1 ± 1.1	7.6 ± 4.6
	7085	79.36	2.41	215	34.3 ± 0.9	20.3 ± 1.8	35.1 ± 1.1	14 ± 3.7
	7088	79.13	5.75	1280	44 ± 1.2	22.0 ± 1.7	33.6 ± 1.1	22 ± 4.1
Средние					34.7	21.6	34.9	17.4
σ					6.2	1.0	2.3	6.0
$\text{Cv}, \%$					17.8	4.6	6.6	34.5
Трог Орла (Стуре)	7091	78.74	24.48	156	36 ± 1.3	37.7 ± 2.5	47.2 ± 0.55	
	7092	79.91	29.2	322	47.4 ± 1.2	31.2 ± 1.9	48.7 ± 0.97	16.2 ± 4.1
	7093	79.73	28.98	265	36.1 ± 1.1	27.5 ± 2.1	40.7 ± 0.96	8.6 ± 3.9
	7094	79.48	28.69	325	64 ± 1.3	33.1 ± 2.2	50.9 ± 0.92	30.9 ± 5.6
	7095	79.2	28.33	198	134.3 ± 1.35	36.1 ± 2.6	50.7 ± 0.67	98.2 ± 11
Средние					63.6	33.1	47.6	38.5
σ					41.2	4.0	4.2	40.9
$\text{Cv}, \%$					64.7	12	8.9	106.2
Средние по массиву данных					42.7	23.6	37.2	21.5
σ					27.1	8.1	9.1	23.1
$\text{Cv}, \%$					63.5	34.3	24.5	107.4

обусловлено, как показано в работе [11], уменьшением сорбционной емкости матрицы осадка.

Коэффициенты, имеющие величину ниже уровня значимости, также приведены в таблице и указывают на возможность и направленность связи. Содержание ^{226}Ra в осадке имеет тенденцию уменьшаться с увеличением окислительно-восстановительного потенциала осадка и возрастать с увеличением доли фракции <60 мкм.

Условия образования донных осадков в разных районах акватории Шпицбергена существенно изменяются, поэтому закономерности и связи условий среды и вещественного состава осадков лучше проявляются на локальных участках акватории.

Максимальные концентрации ^{226}Ra , ^{238}U и ^{232}Th и эксцесса ^{226}Ra получены в осадках Трога Орла. В этом районе содержание органического углерода в осадке также было максимальным. Район характеризуется высокой биопродуктивностью. Величина интегральной первичной продукции фитопланктона (ПП) в Троге Орла, измеренная в работе [21], составляла $1109 \text{ (мг С)} \cdot \text{м}^{-2} \cdot \text{сут}^{-1}$ и была максимальной для акватории Шпицбергена. У кромки ледяных полей в районе

Шпицбергена ПП достигала $992 \text{ (мг С)} \cdot \text{м}^{-2} \cdot \text{сут}^{-1}$ и изменялась в зависимости от местонахождения станции относительно Полярного фронта. Концентрация хлорофилла на станции 7091 составляла 0.29 мг/м^3 .

В районе повышенной биопродуктивности происходит как прижизненное накопление ^{226}Ra , ^{238}U и ^{232}Th морской биотой, так и сорбция этих элементов бариом, детритом и другими органическими остатками морских организмов из морской воды. Кокколитофорида, имеющие кальциевый скелет, извлекают из морской воды кальций и вносят основной вклад в формирование седиментационного потока карбоната кальция, поступающего в донные осадки [22].

Исследования, выполненные на полигоне в Тихом океане, показали, что в процессе биоассимиляции ^{226}Ra фитопланктоном из 1 м^3 фотического слоя абсорбируется до $1.09 \times 10^{-11} \text{ г } ^{226}\text{Ra}$ в день. Таким образом, из воды выводится $2.7 \times 10^{-2}\%$ ^{226}Ra в день [23].

Оценка влияния интенсивности биоассимиляции на эффективность осаждения естественных радионуклидов в зоне арктического фронта обсуждалась в работе [24]. При этом было показано, что эксцесс

Таблица 2. Описание осадка, концентрация $C_{\text{орг}}$, $C_{\text{карб}}$, значения Eh , влажность донных осадков

Станция	$C_{\text{орг}}, \%$	$C_{\text{карб}}, \%$	$Eh, \text{мВ}$	Влажность, %	Фракция <60 мкм	Описание осадка
7053	0.25	3.04	77	47	57.6	Песчано-алеврито-пелитовый ил оливково-коричневого цвета. Осадок окисленный
7057	1.51	2.81	152	46	68.9	Песчано-алеврито-пелитовый ил оливково-коричневого цвета. Осадок окисленный
7061	1.49	1.67	182	63	86	Песчано-алеврито-пелитовый ил темно-серо-коричневого цвета. Осадок окисленный
7063	1.32	2.12	238	42	89.8	Алеврито-пелитовый ил черного цвета. Осадок окисленный
7072	1.72	0.54	132	57	96.6	Алеврито-пелитовый ил темно-коричневого цвета, однородный. Осадок окисленный
7074	1.68	1.02	227	41	85.0	Песчано-алеврито-пелитовый ил темно-оливково-коричневого цвета. Осадок окисленный
7081	1.76	0.62	160	71	88.8	Алеврито-пелитовый ил коричневого цвета. Осадок окисленный
7083	1.42	0.9	291	57	96.6	Алеврито-пелитовый ил коричневого цвета. Осадок окисленный
7085	1.68	0.7	215	64	88.6	Пелитовый ил темно-оливково-коричневого цвета. Осадок окисленный
7088	1.87	0.97	157	64	92.1	Алеврито-пелитовый ил темно-желтовато-коричневого цвета. Осадок окисленный
7091	1.84	0.66	191	30	97.8	Алеврито-пелитовый ил темно-желтовато-коричневого цвета. Осадок окисленный
7092	1.86	0.18	242	72	96.9	Алеврито-пелитовый ил темно-коричневого цвета. Осадок окисленный
7093	1.77	1.17	175	70	94.6	Песчано-алеврито-пелитовый ил темно-коричневого цвета. Осадок окисленный
7094	1.88	0.84	140	65	95.7	Пелитовый ил темно-серо-коричневого цвета. Осадок окисленный
7095	2.08	0	65	69	97.9	Пелитовый ил темно-коричневого цвета. Осадок окисленный
Средние	1.6	1.1	176.3	57.2	88.9	
σ	0.4	0.9	61.2	13.0	11.5	
$C_v, \%$	26	77	35	23	13	

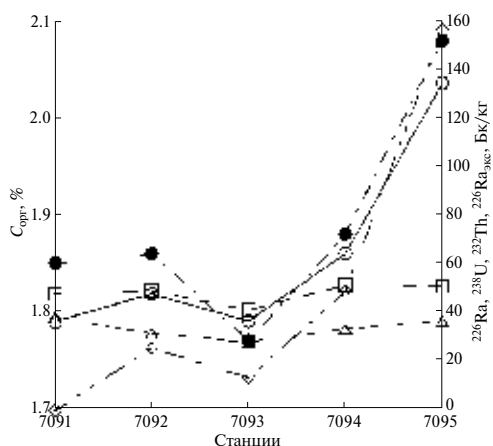


Рис. 2. Концентрации ^{226}Ra (○), ^{238}U (△), ^{232}Th (□), $^{226}\text{Ra}_{\text{экс}}$ (◇), Сорг (●) на станциях в Троге Орла.

^{226}Ra может составлять до 95–99% от общего содержания ^{226}Ra в осадке.

Как показано в работах [10, 11], прямой перенос радия из морской воды в осадки является существенным фактором для его аккумуляции в поверхностном слое донных осадков.

Характер связи содержания $C_{\text{орг}}$ в осадке с концентрацией ^{226}Ra , ^{238}U , ^{232}Th и величиной эксцесса ^{226}Ra в Троге Орла показан на рис. 2.

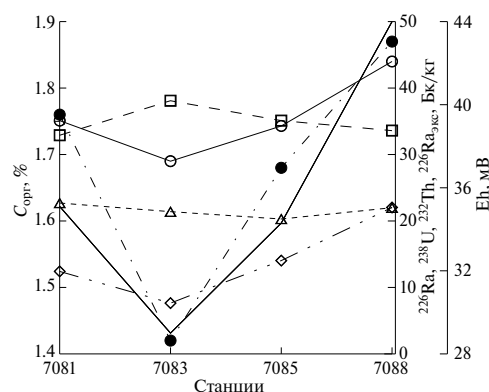


Рис. 3. Концентрации ^{226}Ra (○), ^{238}U (△), ^{232}Th (□), $^{226}\text{Ra}_{\text{экс}}$ (◇), Сорг (●) на станциях в северо-западном районе акватории Шпицбергена.

Коэффициенты корреляции, характеризующие плотность связи концентрации радионуклидов в осадках с параметрами среды, приведены в табл. 4.

Связь концентрации ^{226}Ra и $^{226}\text{Ra}_{\text{экс}}$ с содержанием в осадке органического вещества хорошо выражена, коэффициент корреляции $R = 0.94$ и 0.92 соответственно, что указывает на существенный вклад биологического сообщества в накопление ^{226}Ra в донных осадках зоны повышенной продуктивности. Концентрация ^{226}Ra и значение величины эксцесса ^{226}Ra отрицательно связаны с величиной окислительно-восстановительного потенциала осадка

Таблица 3. Скорости осадкообразования в районе Шпицбергена

Колонка	Широта N	Долгота E	Скорость седиментации	Район
PS66/308–3	81°07.7	12°35.9	3.9 см/1000 лет [14]	Северный склон
PS66/309–1	81°11.2	12°59.1	4.8 см/1000 лет [14]	Северный склон
HN13–04-GC	78°23.4	12°22.45	14 см/1000 лет [15]	Западный склон
BASICC8	77°98	26°8	103 см/1000 лет [16]	Трог Орла
St1245	77°50	19°13	186.95 см/1000 лет [17]	Стур фиорд
St20	74°82	18°02	63 см/1000 лет [18]	Юг акватории
S2528	80°49	29°2	22 см/1000 лет [19]	Трог Орла

Таблица 4. Корреляционная матрица связи концентраций ^{226}Ra , ^{238}U , ^{232}Th и $^{226}\text{Ra}_{\text{экс}}$, Бк/кг, с параметрами среды (при уровне вероятности $P = 0.95$ достоверная величина коэффициента корреляции равна 0.52)

	Глубина, м	^{226}Ra , Бк/кг	^{238}U , Бк/кг	^{232}Th , Бк/кг	$C_{\text{орг}}$, %	$C_{\text{карб}}$, %	Eh , мВ	Фракция <60 мкм	$^{226}\text{Ra}_{\text{экс}}$, Бк/кг
Глубина, м	1.00	–0.44	–0.70	–0.63	–0.54	0.60	–0.04	–0.65	–0.36
^{226}Ra , Бк/кг		1.00	0.62	0.64	0.50	–0.52	–0.48	0.40	0.98
^{238}U , Бк/кг			1.00	0.95	0.73	–0.79	–0.10	0.76	0.59
^{232}Th , Бк/кг				1.00	0.72	–0.81	–0.03	0.78	0.53
$C_{\text{орг}}$, %					1.00	–0.80	0.13	0.81	0.39
$C_{\text{карб}}$, %						1.00	–0.14	–0.87	–0.3905
Eh , мВ							1.00	0.34	–0.54
Фракция <60 мкм								1.00	0.28
$^{226}\text{Ra}_{\text{экс}}$, Бк/кг									1.0

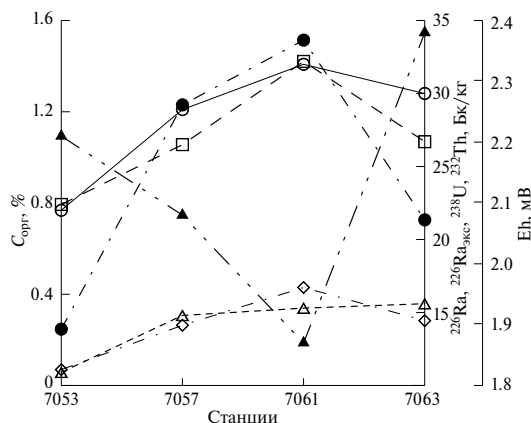


Рис. 4. Концентрации ^{226}Ra (○), ^{238}U (△), ^{232}Th (□), $^{226}\text{Ra}_{\text{экс}}$ (◇), $S_{\text{орг}}$ (●) и значения Eh (▲) на станциях в юго-западном районе акватории Шпицбергена.

($R = -0.88$). Зависимость концентрации ^{238}U и ^{232}Th от Eh слабо выражена, и корреляция недостоверна.

Характер связи содержания $S_{\text{орг}}$ в осадке с концентрацией ^{226}Ra , ^{238}U , ^{232}Th и величиной эксцесса ^{226}Ra в северо-западном районе акватории Шпицбергена показан на рис. 3.

Концентрации ^{226}Ra и $^{226}\text{Ra}_{\text{экс}}$ на станциях северо-западного района симбатно изменяются с содержанием $S_{\text{орг}}$ в осадке. Увеличение терригенной составляющей в осадке, на что указывает повышение концентрации ^{232}Th , приводит к относительно-му снижению концентрации $S_{\text{орг}}$ в осадке. Степень

Таблица 4. Корреляционная матрица связи концентраций ^{226}Ra и $^{226}\text{Ra}_{\text{экс}}$ (Бк/кг) с параметрами среды $S_{\text{орг}}$, $S_{\text{карб}}$ (%) и Eh (мВ) (при уровне вероятности $P = 0.95$ достоверная величина коэффициента корреляции равна 0.85)

	^{226}Ra	$S_{\text{орг}}$	$S_{\text{карб}}$	Eh	$^{226}\text{Ra}_{\text{экс}}$
^{226}Ra	1.00	0.94		-0.86	1.00
$S_{\text{орг}}$		1.00		-0.91	0.99
$S_{\text{карб}}$			1.00		
Eh				1.00	-0.86
$^{226}\text{Ra}_{\text{экс}}$					1

Таблица 5. Матрица коэффициентов корреляции ^{226}Ra , ^{238}U и ^{232}Th с параметрами среды в северо-западном районе акватории Шпицбергена

	^{226}Ra , Бк/кг	^{232}Th , Бк/кг	$S_{\text{орг}}$, %	Eh , мВ	$^{226}\text{Ra}_{\text{экс}}$
^{226}Ra , Бк/кг	1.00		0.92		0.99
^{232}Th , Бк/кг		1.00	-0.93	0.99	
$S_{\text{орг}}$, %			1.00	-0.97	0.89
Eh , мВ				1.00	
$^{226}\text{Ra}_{\text{экс}}$					1.00

окисленности осадка также увеличивается (Eh растет), и количество $S_{\text{орг}}$ уменьшается. При этом концентрация $S_{\text{орг}}$ изменяется в противофазе с содержанием ^{232}Th . Связь концентрации ^{238}U с содержанием ^{226}Ra , ^{232}Th и $S_{\text{орг}}$ статистически недостоверна. Значения коэффициентов корреляции приведены в табл. 5.

В северо-западном районе акватории Шпицбергена, так же как и в Троге Орла, концентрация ^{226}Ra и эксцесс $^{226}\text{Ra}_{\text{экс}}$ увеличиваются с ростом содержания $S_{\text{орг}}$. Концентрация ^{232}Th положительно связана с Eh ($R = 0.99$) и уменьшается с увеличением $S_{\text{орг}}$ ($R = -0.93$). Содержание $S_{\text{орг}}$ снижается с увеличением Eh ($R = -0.97$).

В юго-западном районе акватории Шпицбергена концентрации ^{226}Ra и $^{226}\text{Ra}_{\text{экс}}$ увеличиваются с содержанием $S_{\text{орг}}$ и снижаются с увеличением Eh и окислением $S_{\text{орг}}$ (рис. 4).

С увеличением глубины Eh снижается, а $S_{\text{карб}}$ растет ($R = 0.96$) (табл. 6).

На северном склоне Шпицбергена (станции 7072 и 7074) концентрация $S_{\text{орг}}$ уменьшается с увеличением Eh . Концентрации ^{226}Ra , ^{238}U , ^{232}Th увеличиваются с ростом содержания $S_{\text{орг}}$ и снижаются с глубиной и величиной Eh (табл. 7).

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Полученные данные о концентрации ^{226}Ra , ^{238}U и ^{232}Th показывают, что превышение содержания радия над его равновесной концентрацией с ураном в осадке обусловлено поступлением в осадки ^{226}Ra , накопленного морской биотой, абсорбированного баритом, детритом, а также другими органическими остатками морских организмов из морской воды. При этом доля ^{226}Ra , неравновесного с ^{238}U , пропорциональна количеству органического углерода в поверхностном слое осадка. В целом для всего массива наблюдений концентрации ^{226}Ra , ^{238}U и ^{232}Th величина $^{226}\text{Ra}_{\text{экс}}$ увеличиваются с ростом содержания в осадке органического углерода и негативно связаны с содержанием $S_{\text{карб}}$.

Доля радия, образованного при распаде ^{230}Th ($^{226}\text{Ra}_{\text{до}}$), в общем содержании радия в осадке северного континентального склона Шпицбергена не превышает 5–19%. Величина эксцесса ^{226}Ra в измеренных пробах составляет от 24 до 73% от величины концентрации ^{226}Ra в осадке. С увеличением глубины концентрации ^{238}U и ^{232}Th снижаются ($R = -0.79$, -0.81 соответственно). На станциях с глубинами более 1200 м снижение концентрации ^{226}Ra и ^{238}U с глубиной более выражено ($R = -0.74$ и -0.75 соответственно).

В области зоны повышенной биопродуктивности (Трог Орла) связь концентрации ^{226}Ra и $^{226}\text{Ra}_{\text{экс}}$ с содержанием в осадке органического вещества хорошо выражена, коэффициенты корреляции $R = 0.94$ и 0.92 соответственно, что указывает на существенный вклад биологического сообщества в накопление ^{226}Ra в донных осадках. При этом увеличения концентрации ^{238}U и ^{232}Th в осадке не отмечено. Эта закономерность

Таблица 6. Матрица коэффициентов корреляции ^{226}Ra , ^{238}U , ^{232}Th и $^{226}\text{Ra}_{\text{экс}}$ с параметрами среды в юго-западном районе акватории Шпицбергена

	Глубина	^{226}Ra , Бк/кг	^{238}U , Бк/кг	^{232}Th , Бк/кг	$C_{\text{орг}}$, %	$C_{\text{карб}}$, %	$^{226}\text{Ra}_{\text{экс}}$, Бк/кг
Глубина	1.00					0.96	
^{226}Ra , Бк/кг		1.00	0.97	0.90	0.85		0.97
^{238}U , Бк/кг			1.00				
^{232}Th , Бк/кг				1.00	0.90		
$C_{\text{орг}}$					1.00		0.91
$C_{\text{карб}}$						1.00	
$^{226}\text{Ra}_{\text{экс}}$, Бк/кг							1.00

Таблица 7. Концентрации ^{226}Ra , ^{238}U , ^{232}Th , $^{226}\text{Ra}_{\text{экс}}$ на станциях северного склона Шпицбергена

Станции	Глубина	^{226}Ra , Бк/кг	^{238}U , Бк/кг	^{232}Th , Бк/кг	$^{226}\text{Ra}_{\text{экс}}$, Бк/кг	$C_{\text{орг}}$, %	$C_{\text{карб}}$, %	Eh , мВ
7072	2041	35.5 ± 1.3	25.5 ± 1.7	40.1 ± 1.3	10 ± 3	1.72	0.54	132
7074	2503	32 ± 0.79	20.6 ± 1.26	32.7 ± 1.0	11.4 ± 2	1.68	1.02	227

выполняется и в других районах акватории Шпицбергена. Концентрация ^{226}Ra и значение эксцесса ^{226}Ra отрицательно связаны с величиной окислительно-восстановительного потенциала осадка.

БЛАГОДАРНОСТИ

Автор признателен сотрудникам института Новичкову Е.А. и Стародымову Д.П. за отбор проб осадков, помощь в выполнении измерений и полезные советы при подготовке материалов публикации.

ФОНДОВАЯ ПОДДЕРЖКА

Работа выполнена в рамках государственного задания Министерства науки и высшего образования Российской Федерации FMWE-2021-0007. Отбор проб осадков в экспедициях ИО РАН проведен по теме госзадания Минобрнауки № FMWE-2021-0006.

КОНФЛИКТ ИНТЕРЕСОВ

Автор данной статьи заявляет об отсутствии конфликта интересов.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Думанская И.О. Система Баренцева моря / Под ред. А.П. Лисицына. М.: ГЕОС, 2021. С. 179–194.
- Харин Г.С., Ерошенко Д.В., Исаченко С.М., Булохов А.В., Малафеев Г.В., Политова Н.В. // Океанологические исследования. 2020. Т. 48. № 2. С. 135–150.
- Титова Е.Ф., Ахмедзянов В.Р. // Мониторинг. Наука и технологии. 2020. Вып. 3. № 12. С. 35–47.
- Маслов А.В., Политова Н.В., Козина Н.В., Шевченко В.П., Алексеева Т.Н. // Литология и полезные ископаемые. 2020. № 1. С. 3–27.
- Иванов Г.И. НАЗВАНИЕ КНИГИ СПб: ВНИИОкеанология, 2002. 153 с.
- Yakovlev E., Puchkov A. // Mar. Pollut. Bull. 2020. Vol. 160. Article 111571. <https://doi.org/10.1016/j.marpolbul.2020.111571>
- Yakovlev E., Puchkov A., Druzhinin S. // Mar. Pollut. Bull. 2023. Vol. 189. Article 114809. <https://doi.org/10.1016/j.marpolbul.2023.114809>
- Маслов А.В., Политова Н.В., Кловиткин А.А., Козина Н.В., Кравчишина М.Д., Новигатский А.Н., Новичкова Е.А., Шевченко В.П. // Докл. РАН. Науки о земле. 2022. Т. 507. № 2. С. 323–331.
- Le Roy E., Sanial V., Charette M.A., van Beek P., Lacan F., Jacques S.H.M., Henderson P.B., Souhaut M., García-Ibáñez M.I., Jeandel C., Pérez F.F., Sarthou G. // Biogeosciences. 2018. Vol. 15. P. 3027–3048.
- Старик И.Е., Кузнецов Ю.В., Легин В.К. // Радиохимия. 1959. Т. 1. № 3. С. 321–324.
- Кузнецов Ю.В., Симоняк З.В., Лисицын А.П., Френклин М.С. // Геохимия. 1968. № 3. С. 323–333.
- Кравчишина М.Д., Кловиткин А.А., Володин В.Д., Глуховец Д.И., Дубинина Е.О., Круглинский И.А., Кудрявцева Е.А., Матуль А.Г., Новичкова Е.А., Политова Н.В., Саввичев А.С., Силкин В.А., Стародымова Д.П. // Океанология. 2022. Т. 62. № 4. С. 660–663.
- Кравчишина М.Д., Кловиткин А.А., Володин В.Д., Глуховец Д.И., Дубинина Е.О., Круглинский И.А., Кудрявцева Е.А., Матуль А.Г., Новичкова Е.А., Политова Н.В., Саввичев А.С., Силкин В.А., Стародымова Д.П. // Океанология. 2022. Т. 62. № 4. С. 660–663.
- Winkelmann D., Stein C., Schfer R., Mackensen A. // Geochem. Geophys. Geosyst. 2008. Vol. 9. P. 1–14.
- Butschek F., Arosio R., William E.N., Noormets A.R., Howe J.A. // Arktos. 2019. Vol. 5. P. 1–14.
- Vare L.L., Masse G.B. // Holocene. 2010. Vol. 20. P. 637–643.
- Winkelmann D., Knies J. // Geochem. Geophys. Geosyst. 2005. Vol. 6. N 9. P. 1–22.
- Pathirana I., Knies J., Felix M., Mann U. // Clim. Past. 2014. Vol. 10. P. 569–587.
- Иванова Е.В., Мурдмаа И.О. // Система Баренцева моря / Под ред. А.П. Лисицына. М.: ГЕОС, 2021. С. 109–126.
- Кудрявцева Е.А., Кравчишина М.Д., Паутова Л.А., Русанов И.И., Силкин В.А., Глуховец Д.И., Торгунова Н.И., Нецветова О.П., Политова Н.В., Кловиткин А.А., Саввичев А.С. // Докл. РАН. Науки о земле. 2023. Т. 508. № 1. С. 108–114.

21. Glukhovets D., Sheberstov S., Vazyulya S., Yushmanova A., Salyuk P., Sahling I., Aglova E. // Remote Sens. 2022. V. 14. N 19. P. 4995.
22. Poulton A.J., Painter S.C., Young J.R. et al. // Global Biogeochem. Cycles. 2013. Vol. 27. P. 1023–1033.
23. Доманов М.М., Сапожников Ю.А., Сурин Н.М., Водяная Е.Г. // Радиохимия. 2004. Т. 46. № 2. С. 188–192.
24. Доманов М.М., Амбросимов А.К., Новичкова Е.А. // Радиохимия. 2019. Т. 61. № 5. С. 446–449.

DISTRIBUTION FEATURES OF ^{238}U , ^{232}Th AND ^{226}Ra IN BOTTOM SEDIMENTS OF THE SHELF AND CONTINENTAL SLOPE OF SVALBARD

M. M. Domanov

*Shirshov Institute of Oceanology, Russian Academy of Sciences, Nakhimovskii pr., 36, Moscow, 117997 Russia
e-mail: domanov@ocean.ru*

Received July 22, 2023; revised December 27, 2023; accepted December 29, 2023

Abstract—The features of the distribution of concentrations of ^{238}U , ^{232}Th and ^{226}Ra in the surface layer of bottom sediments in the bottom sediments of the shelf and continental slope of Svalbard are considered. The content of ^{226}Ra , ^{232}Th , and ^{238}U varied in the range 22–134.3, 22.4–50.9, and 10.9–37.7 Bq/kg, respectively. The amount of ^{226}Ra nonequilibrium with ^{238}U ($^{226}\text{Ra}_{\text{ex}}$) ranged from 23 to 73% of the total ^{226}Ra content in sediments. The maximum concentrations of ^{226}Ra , ^{238}U , ^{232}Th and $^{226}\text{Ra}_{\text{ex}}$ (134.3, 37.7, 50.9, and 98.2 Bq/kg, respectively) were obtained in the area of increased bioproductivity (Eagle Trough). In this zone, the relationship between the concentrations of ^{226}Ra and $^{226}\text{Ra}_{\text{ex}}$ with the content of organic matter in sediment is well expressed, the correlation coefficients are $R = 0.94$ and 0.92 , respectively, which indicates a significant contribution of the biological community to the accumulation of ^{226}Ra in bottom sediments. The ^{226}Ra concentration and the ^{226}Ra excess value are negatively related to the redox potential of the sediment ($R = -0.88$). This pattern is also true in other areas of the Svalbard waters. In general, for the entire array of observations, the concentrations of ^{238}U and ^{232}Th increase with increasing content of organic carbon in the sediment ($R = 0.72$ and 0.7 , respectively). The concentrations of ^{238}U and ^{232}Th decrease with increasing C_{carb} content in the sediment ($R = -0.79$ and -0.81 , respectively). The data obtained indicate the need to take into account the ^{226}Ra excess when assessing the total natural radioactivity of marine sediments, the value of which may exceed the radioactivity of ^{238}U and ^{232}Th .

Keywords: Barents Sea, bottom sediments, radium, thorium, uranium