

УДК 550.422 (98)

ГЕОХИМИЧЕСКИЙ ФОН РТУТИ В ДОННЫХ ОТЛОЖЕНИЯХ ВОСТОЧНОЙ АРКТИКИ

© 2023 г. К. И. Аксентов^{1,*}, В. В. Саттарова¹, А. С. Астахов¹, Суэфа Ши², М. В. Иванов¹,
А. В. Алаторцев¹, Д. В. Ким¹

Представлено академиком РАН Г.И. Долгих 13.03.2023 г.

Поступило 13.03.2023 г.

После доработки 27.03.2023 г.

Принято к публикации 28.03.2023 г.

На основе датированных кернов донных отложений были выбраны слои, накопленные в доиндустриальный период. В них определены концентрации ртути, которые являются геохимическим фоном для выбранных акваторий. Изменчивость концентраций ртути в отложениях внутреннего шельфа мала (20–30 мкг/кг) и может использоваться как основа для экологической оценки при хозяйственном освоении арктических регионов.

Ключевые слова: ртуть, Арктика, донные осадки

DOI: 10.31857/S2686739723600443, **EDN:** RYIATO

Быстрые климатические изменения наиболее чутко проявляются в арктическом регионе. Наблюдаемое потепление создает перспективы для освоения территорий высоких широт и интенсификации эксплуатации Северного Морского пути, что неизбежно приведет к поступлению загрязняющих веществ в прибрежные акватории и накоплению их в донных отложениях. Так же донные отложения являются ретроспективным интегрированным показателем изменения окружающей среды. Одним из опасных поллютантов является ртуть, оказывающая нейротоксическое воздействие. Геологи оценили содержание ртути в почве в областях вечной мерзлоты и обнаружили, что в ней содержится примерно в два раза больше ртути, чем в остальной почве, а также океанах и атмосфере, вместе взятых [1]. При таянии вечной мерзлоты возможно дополнительное поступление ртути в арктические морские экосистемы. Обширные области восточной Сибири заняты вечной мерзлотой, которая в настоящее время деградирует, и тем самым талый материал может выноситься в акваторию шельфа. Гумификация и таяние вечной мерзлоты приводят к увеличению

содержания самой токсичной и биодоступной формы ртути в морской воде – метильной [2]. Количество метильной формы зависит от общего количества ртути. В отсутствие прямых наблюдений оценку динамики поступления ртути возможно провести лишь по донным отложениям.

В нашей работе поставлена цель оценить геохимический фон ртути в донных отложениях, т.е. те концентрации, которые были накоплены в доиндустриальный период. Для этого были выбраны керны донных отложений, которые датированы радиоизотопным методом на основе свинца-210 (рис. 1). Определение ртути выполнено на атомно-абсорбционном спектрометре PA915M с пиролитической приставкой ПИРО915+. Элементный состав определялся рентген-флуоресцентным методом на спектрометре Delta DPO 2000 Olympus. Точность определения элементов проверялась по международным стандартам донных отложений HISS-1, MESS-4, PACS-3, BCR-277. Органический углерод определялся в Центре коллективного пользования ДВГИ ДВО РАН на атомно-абсорбционном спектрометре “Shimadzu” TOC-L с приставкой для анализа твердых проб SSM-5000A. Для полученных аналитических данных была выполнена z-стандартизация и проведена обработка основными статистическими методами (корреляционный, кластерный и факторный анализы).

Изучаемые керны донных отложений сложены в основном алевроит-пелитовыми частицами, доля песка увеличивается в отложениях, распространенных на внутреннем шельфе в зонах влияния крупных рек (Лена, Индигирка, Колыма).

¹ Тихоокеанский океанологический институт им. В.И. Ильичева, Дальневосточное отделение Российской академии наук, Владивосток, Россия

² Первый институт океанографии Министерства природных ресурсов КНР, Ксианксиалинг роуд 6, Циндао, 266061 КНР

*E-mail: aksentov@poi.dvo.ru

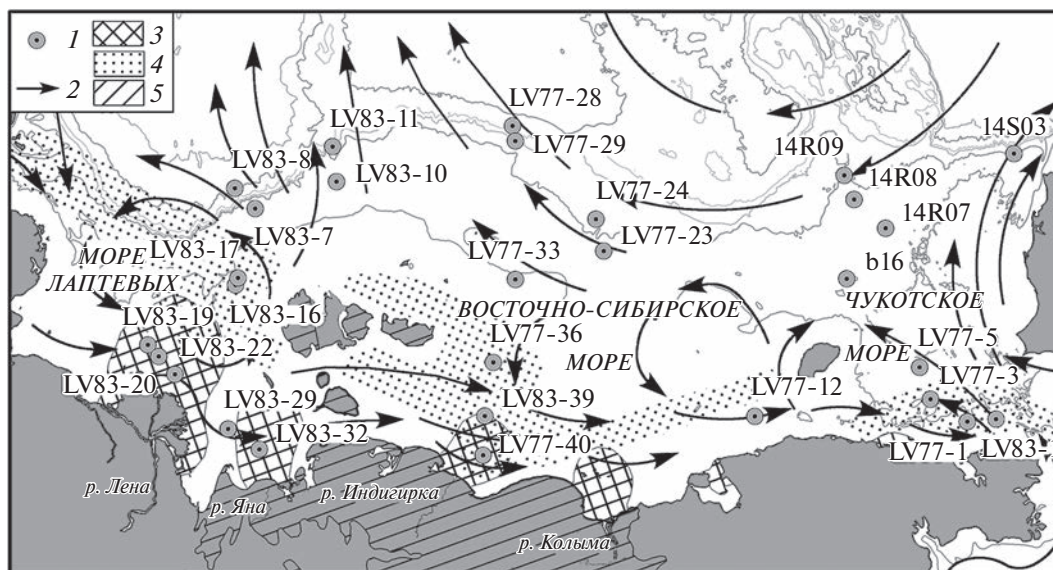


Рис. 1. Карта-схема района исследований. 1 — станции отбора донных отложений; 2 — поверхностные течения; 3 — зона интенсивного судоходства [3]; 4 — вынос реками и приливно-отливными течениями промышленных, портовых, военных отходов, сточные воды; 5 — повсеместное развитие ледового комплекса [4].

Окисленный слой (от коричневого до светло-коричневого) залегает в поверхностных горизонтах мощностью от первых сантиметров на внутреннем шельфе и до 30–50 см на внешнем шельфе и склоне. Доля биогенных компонентов (диатомовые, радиолярии, спикулы губок) возрастает в донных отложениях Чукотского моря. Современные скорости осадконакопления на внутреннем шельфе составляют 0.15–0.20 см/год, на внешнем шельфе и глубоководных частях уменьшаются до 0.02–0.05 см/год [5–8].

Распределение ртути и других химических элементов представлено в табл. 1. Наблюдается тренд увеличения концентраций ртути в донных отложениях от внутреннего (глубина менее 50 м) шельфа к склону. Фоновые концентрации ртути в донных отложениях внутреннего шельфа изучаемых морей находится на уровне 20–32 мкг/кг. Исключение составляют донные отложения внутреннего шельфа юго-восточной части моря Лаптевых (станции LV83-29 и LV83-32) (рис. 1), концентрации ртути в которых составляют 38–39 мкг/кг. Здесь обнаружены железомарганцевые образования, что говорит о специфических геохимических условиях, в которых ртуть может дополнительно сорбироваться гидроокислами железа и марганца. Данный факт требует отдельного изучения. Донные отложения внешнего шельфа (от 50 до 200 м) характеризуются повышенным уровнем ртути с концентрациями 40–56 мкг/кг, при этом максимальная концентрация (66 мкг/кг) обнаружена в Восточно-Сибирском море. Глубоководные отложения опробованы на склонах морей Лаптевых и Восточно-

Сибирского, где концентрации ртути составили 32–34 и 41–50 мкг/кг соответственно (табл. 1).

На основе статистического анализа были выделены ассоциации химических элементов (рис. 2), отражающие векторы геохимической дифференциации осадочного процесса. Первый фактор объясняет 26% дисперсии, который сформирован положительными значениями Zn, Hg, Cu, Fe и отрицательными Zr, Sr. Данный фактор можно интерпретировать как субширотную зональность — изменение фациальных условий от прибрежных со значимым содержанием грубозернистых фракций до глубоководных илов (“красных глин”). Второй фактор объясняет 23% общей дисперсии и сформирован положительными значениями Al, K, Ti, Y, Nb и отрицательными Ca. Данный фактор отражает субмеридиональную зональность — уменьшение влияния терригенного материала, выносимого крупными сибирскими реками и увеличение доли биогенных морских компонентов в направлении с запада на восток (от моря Лаптевых к Чукотскому морю). Выделенные кластеры дополняют результаты факторного анализа по интерпретации литолого-геохимической дифференциации осадочного материала (рис. 2). Кластер I соответствует фациям донных отложений с преобладанием песчанистой фракции. Кластер II отражает влияние выносов терригенного материала различных геологических провинций бассейна реками Лена, Яна, Индигирка и абразии коренных пород побережья. Кластер III трудно однозначно интерпретировать, вероятно, его выделение на основе элементов, отражающих биогенные компоненты ($C_{орг}$, P, Mg), и серы, связано

Таблица 1. Содержание химических элементов в слоях донных осадков, накопленных в доиндустриальную эпоху

Станция	Глубина, м	Hg, мкг/кг	C _{орг} , %	Al, %	Si, %	Mn, %	Fe, %	Ca, %	Zr, мг/кг
море Лаптевых									
LV83-7	82	17	0.76	7.5	25.9	0.16	4.6	0.86	175
LV83-8	2450	32	0.96	8.6	24.5	0.29	5.4	0.82	153
LV83-10	77	33	0.89	7.0	22.5	0.39	4.6	0.70	172
LV83-11	975	34	1.01	8.3	23.9	0.36	5.5	0.72	145
LV83-16	41	25	1.30	7.9	25.1	0.06	4.8	0.81	161
LV83-17	49	27	1.10	7.9	25.5	0.06	4.5	0.79	177
LV83-19	30	10	0.51	6.2	30.2	0.03	2.1	1.12	346
LV83-20	31	18	0.73	7.3	29.3	0.03	2.7	1.18	248
LV83-22	24	38	1.83	8.6	26.4	0.04	4.9	0.80	164
LV83-29	15	39	1.45	7.9	26.5	0.25	4.6	0.93	175
LV83-32	19	38	1.44	8.6	26.6	0.06	4.9	0.60	183
Восточно-Сибирское море									
LV77-12	37	23	1.21	6.9	28.7	0.03	3.4	0.81	198
LV77-23	138	66	0.80	8.2	25.1	0.63	5.0	0.66	147
LV77-24	250	47	0.54	7.6	24.8	0.57	4.6	0.74	177
LV77-28	1375	41	0.73	8.8	24.5	0.49	5.8	0.89	141
LV77-29	370	50	0.69	8.2	24.6	0.45	5.2	0.93	154
LV77-33	46	42	0.83	8.4	26.3	0.13	5.0	0.56	167
LV77-36	35	32	0.80	8.1	26.5	0.08	4.5	0.59	188
LV77-40	13	22	0.73	8.6	31.0	0.09	4.0	0.66	265
LV83-39	27	29	0.80	8.1	27.2	0.07	4.3	0.67	211
Чукотское море									
14R07	73	26	1.22	6.3	26.9	0.03	3.8	1.01	143
14R08	181	56	1.51	7.4	26.8	0.05	4.4	0.93	134
14R09	184	55	0.99	7.1	26.5	0.57	4.3	1.10	184
14S03	172	39	1.63	7.4	26.3	0.03	4.6	1.03	133
B16	100	25	1.78	6.5	27.3	0.03	3.7	1.03	137
LV77-1	45	28	2.45	6.3	27.8	0.03	3.8	1.31	144
LV77-3	51	31	1.89	6.4	27.6	0.03	3.6	1.25	136
LV77-5	50	23	1.59	6.3	27.2	0.03	3.5	1.46	156
LV83-1	43	20	1.40	6.1	29.7	0.03	2.9	1.56	179

с перераспределением органического материала и процессами раннего диагенеза. Кластер IV образован элементами, отражающими хемогенную глубоководную седиментацию. Как видно из рис. 2, ртуть участвует в формировании фактора 1 и входит в ассоциацию элементов кластера IV, а также

дополнительно имеет значимые положительные корреляции с Al и Rb. Следовательно, на концентрирование ртути в донных отложениях доиндустриальной эпохи влияли сорбционные процессы на гидроокислах марганца и железа, и глинистых минералах. В то же время наблюдается

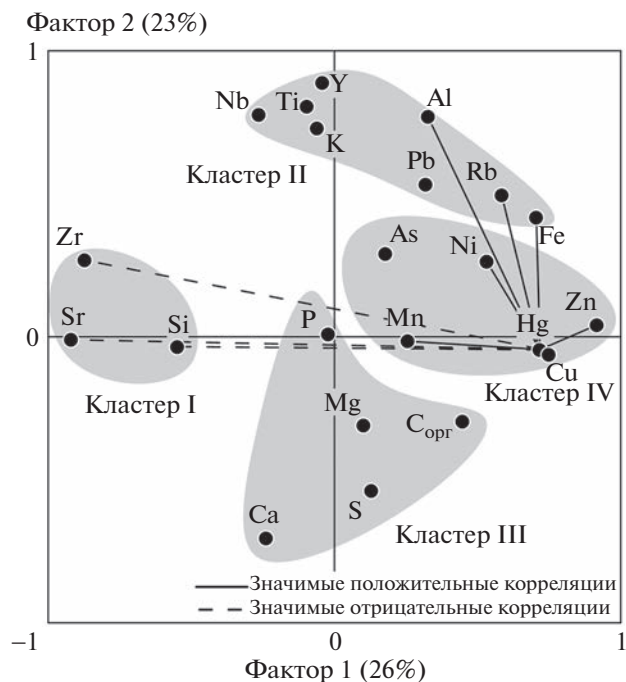


Рис. 2. Результаты статистической обработки аналитических данных.

отсутствие корреляции ртути с органическим углеродом, что, возможно, связано с его различным генезисом. Для моря Лаптевых превалирует терригенный источник. В то же время, в Чукотском море возрастает доля морского планктоногенного органического материала [4]. Распределение по гранулометрическим фракциям указывает на аккумуляцию ртути в тонкодисперсных фракциях (<2 и 2–8 мкм) с концентрациями 60–80 мкг/кг. В песчаных фракциях концентрации минимальны и соответствуют уровню 4–12 мкг/кг.

Для Чукотского моря существуют оценки фоновых концентраций ртути, сделанные другими исследователями. Согласно этим исследованиям, фоновые концентрации ртути находятся на уровне от 29 мкг/кг [9] до 37 мкг/кг [10]. В двух коротких кернах, отобранных в каньоне Геральд (Чукотское море), концентрации ртути в фоновых горизонтах находятся на постоянном уровне и составляют 40 и 45 мкг/кг [11].

На основе представленных данных следует, что уровень фоновых концентраций ртути зависит от литолого-фациальных условий осадконакопления. При этом для внутреннего шельфа, на который предполагается большее антропогенное воздействие в будущем, концентрации ртути имеют малую изменчивость и находятся на уровне 20–30 мкг/кг. Проведенные исследования создают предпосылки для пересмотра и разработки новых нормативов для санитарно-гигиенической оценки компонентов окружающей среды в инже-

нерных изысканиях и экологическом мониторинге.

БЛАГОДАРНОСТИ

Авторы благодарят А.А. Босина и Е.Г. Вологину за предоставление дополнительных проб донных отложений из Чукотского моря, Н.В. Зарубину, О.В. Суханову за определение органического углерода.

ИСТОЧНИК ФИНАНСИРОВАНИЯ

Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда № 22-27-00469, <https://rscf.ru/project/22-27-00469>.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Schuster P.F., et al. Permafrost Stores a Globally Significant Amount of Mercury // *Geophys. Res. Lett.* 2018. V. 45. № 3. P. 1463–1471.
2. Krabbenhoft D.P., Sunderland E.M. Global change and mercury // *Science*. 2013. V. 341. № 6153. P. 1457–1458.
3. Национальный атлас России: в 4 т. Т. 2. Природа. Экология. М.: Роскартография, 2007. 495 с.
4. Дударев О.В., Чаркин А.Н., Шахова Н.Е., Мазуров А.К., Семилетов И.П. Современный литоморфогенез на восточно-арктическом шельфе России. Томск: Томский политехнический университет, 2016. 192 с.
5. Астахов А.С. и др. Ледовые условия Чукотского моря в последние столетия: реконструкции по седиментационным записям // *ДАН*. 2018. Т. 480. № 4. С. 485–490.
6. Астахов А.С. и др. Роль ледяного покрова в формировании химического состава донных осадков восточносибирского шельфа // *Геохимия*. 2021. Т. 66. № 6. С. 526–540.
7. Вологина Е.Г. и др. Реконструкция условий позднеголоценового осадконакопления по данным комплексного анализа колонки донных отложений Чукотского моря // *ДАН*. 2016. Т. 469. № 5. С. 597–601.
8. Вологина Е.Г. и др. Вещественный состав позднеголоценовых отложений южной части Чукотского моря // *Океанология*. 2023. Т. 63. № 1. С. 84–94.
9. Trefry J.H., et al. Trace metals and organic carbon in sediments of the northeastern Chukchi Sea // *Deep Sea Res. Part II Top. Stud. Oceanogr.* 2014. V. 102. P. 18–31.
10. Wang J., et al. Ecological Risk Assessment of Trace Metal in Pacific Sector of Arctic Ocean and Bering Strait Surface Sediments // *Int. J. Environ. Res. Public Health*. 2022. V. 19. № 8. P. 4454.
11. West G., et al. Late Holocene Paleomagnetic Secular Variation in the Chukchi Sea, Arctic Ocean // *Geochemistry, Geophysics, Geosystems*. 2022. V. 23. № 5. P. e2021GC010187.

MERCURY BACKGROUND IN BOTTOM SEDIMENTS OF THE EASTERN ARCTIC

**K. I. Aksentov^{a,#}, V. V. Sattarova^a, A. S. Astakhov^a, Xuefa Shi^b, M. V. Ivanov^a,
A. V. Alatorsev^a, and D. V. Kim^a**

^a *Il'ichev Pacific Oceanological Institute, Far Eastern Branch of the Russian Academy of Sciences,
Vladivostok, Russian Federation*

^b *First Institute of Oceanography, Ministry of Natural Resources of China, 6 Xianxialing Road, Qingdao, China*

[#] *E-mail: aksentov@poi.dvo.ru*

Presented by Academician of the RAS G.I. Dolgikh March 13, 2023

On the basis of dated bottom sediment cores, layers accumulated in the pre-industrial period were selected. They determine the mercury concentrations, which are the geochemical background for the selected water areas. The variability of mercury concentrations in the sediments of the inner shelf is small (20–30 µg/kg) and can be used as a basis for environmental assessment in the economic development of the Arctic regions.

Keywords: mercury, Arctic, bottom sediment