

УДК 551.345

РТУТЬ В МЕРЗЛЫХ ЧЕТВЕРТИЧНЫХ ОТЛОЖЕНИЯХ арх. ШПИЦБЕРГЕН© 2023 г. Н.Э. Демидов^{1*}, А.В. Гузева^{1,2}, А.Л. Никулина¹, С. Веттерих^{3,4},
Л. Ширрмайстер³¹ Государственный научный центр «Арктический и антарктический научно-исследовательский институт»,
г. Санкт-Петербург, Россия² Институт озероведения РАН – Санкт-Петербургский федеральный исследовательский центр РАН,
г. Санкт-Петербург, Россия³ Институт Альфреда Вегенера Центра полярных и морских исследований им. Гельмгольца,
отдел исследований вечной мерзлоты, г. Потсдам, Германия⁴ Технический университет Дрездена, Институт географии, г. Дрезден, Германия

* nikdemidov@mail.ru

Поступила в редакцию 14.03.2023 г.; после доработки 04.05.2023 г.

Принята к публикации 10.05.2023 г.

Аннотация. Деградация мерзлых толщ, происходящая на фоне потепления климата, может приводить к поступлению в биосферу климатически и биологически активных веществ, в том числе ртути. В рамках данной работы проведены исследования валового содержания ртути и органического углерода в мерзлых четвертичных отложениях, вскрытых 15 скважинами на арктическом архипелаге Шпицберген (всего 157 образцов). Поскольку четвертичные отложения формируются путем выветривания коренных пород, содержание ртути анализировалось и в образцах скальных грунтов. Результаты исследований показали, что концентрация ртути в мерзлых четвертичных отложениях варьирует от 21 до 94 нг/г, среднее значение – 40 нг/г. Корреляция содержания ртути с концентрацией органического углерода не выявлена. Отсутствуют закономерности аккумуляции ртути в зависимости от фациальной обстановки осадконакопления, геоморфологического положения, времени образования осадка и характера промерзания. Среднее содержание ртути в коренных породах относительно низкое – 8 нг/г, значит, она поступала в мерзлые четвертичные отложения во время осадконакопления преимущественно не из коренных пород при выветривании, а путем образования комплексов с органическим веществом или в результате сорбции на глинистых частицах. В контексте продолжающейся дискуссии о поступлении ртути в экосистемы из мерзлоты полученные нами результаты могут рассматриваться в качестве доиндустриальных фоновых значений.

Ключевые слова: ртуть, вечная мерзлота, органический углерод, Шпицберген.

DOI: <https://doi.org/10.21455/GPB2023.2-6>

Цитирование: Демидов Н.Э., Гузева А.В., Никулина А.Л., Веттерих С., Ширрмайстер Л. Ртуть в мерзлых четвертичных отложениях арх. Шпицберген // Геофизические процессы и биосфера. 2023. Т. 22, № 2. С. 134–142. <https://doi.org/10.21455/GPB2023.2-6>

ВВЕДЕНИЕ

Происходящая на фоне потепления климата деградация мерзлых толщ помимо очевидного негативного воздействия на инженерную инфраструктуру имеет важное значение в плане потенциального влияния на глобальные биогеохимические циклы. Анализ содержания климатически и биологически активных веществ в мерзлоте, как и оценка скорости их вовлечения в общий круговорот веществ, – актуальная задача на стыке мерзлотоведения и биогеохимии. Считается, что значительные запасы органического вещества, законсервированного в мерзлоте, при ее оттаивании вовлекаются в современный круговорот. Разложение органики при участии микроорганизмов должно приводить к ее минерализации с выделением парниковых газов (CO₂ и CH₄), т.е. усиливать потепление климата [Schuur et al.,

2015]. Оттаивание мерзлых пород необходимо также учитывать с точки зрения возможности поступления в биосферу значительных количеств ртути, которая образует комплексы с органическим веществом [Schaefer et al., 2020].

Внимание к ртути понятно, поскольку она наряду с As, Cd, Se, Pb, Zn является одним из наиболее токсичных металлов. Учитывая потенциальную опасность ртути, а также большое содержание органического вещества в почвах вечной мерзлоты и способность мхов и лишайников накапливать ртуть из атмосферы, предпринимались попытки изучения ее в почвах и торфяниках на глубину около 3 м [Olson et al., 2018; Schuster et al., 2018; Lim et al., 2020]. Однако увеличение глубины сезонного оттаивания, опускание верхней границы мерзлоты, термокауст, термоабразия мобилизуют органику и связанную с ней ртуть не только из

поверхностных почвенных горизонтов, но и из ниже лежащих мерзлых отложений. Оценки содержания ртути в мерзлых отложениях, залегающих на глубинах до нескольких десятков метров, к настоящему времени были сделаны лишь в одной работе на примере Якутии [Rutkowski et al., 2021]. Этого явно недостаточно для понимания основных закономерностей распределения ртути в мерзлоте и ответа на вопрос: можно ли считать мерзлоту значимым хранилищем ртути и может ли деградация мерзлоты привести к резкому увеличению поступления данного элемента в экосистемы.

С целью пополнения немногочисленных на настоящий момент сведений о ртути в толщах мерзлых пород в рамках данной работы были проведены исследования на арктическом архипелаге Шпицберген, где мощность многолетнемерзлых пород составляет более 200 м. В связи с потеплением климата мерзлота подвержена риску деградации [Boike et al., 2018; Christiansen et al., 2021]. В районе пос. Баренцбург изучение вечной мерзлоты проводилось отечественными учеными начиная с 1930-х годов в связи с эксплуатацией угольных месторождений. Исследования были продолжены с 2016 г. в рамках работ Российской научной экспедиции на арх. Шпицберген (РАЭ-Ш). В последние годы здесь обустроены термометрические скважины и площадки мониторинга сезонно-талого слоя (СТС), вошедшие в международную сеть наблюдений GTNP [Демидов и др., 2016]. Кроме того, установлены общие черты мерзлотно-гидрогеологического строения территории [Демидов и др., 2020], изучены криогенные явления [Демидов В.Э., Демидов Н.Э., 2019; Demidov et al., 2019, 2021, 2022], сделаны датировки отложений, дана микробиологическая характеристика мерзлоты [Караевская и др., 2021а, б]. Анализы содержания ртути в кернах выполнялись параллельно с перечисленными работами в период с 2016 по 2023 г. непосредственно в химико-аналитической лаборатории РАЭ-Ш в пос. Баренцбург.

В упомянутых выше источниках можно найти детальное описание температур, криолитологического строения и состава водной вытяжки 10 из 15 скважин, материалы изучения которых послужили основой для написания данной статьи. Район пос. Баренцбург делает полезным для исследований полигоном не только высокая степень его геокриологического разнообразия и изученности, но и наличие информации о содержании ртути в современных донных грунтах зал. Грен-фьорд, на берегу которого он расположен [Лебедева и др., 2018], и в почвах соседней долины Адвентдален [Halbach et al., 2017]. Кроме того, ранее на Шпицбергене было проанализировано содержание ртути в современных донных грунтах еще трех заливов (Хорсунн, Вийде-фьорд, Диксон-фьорд) и сделано предположение о том, что деградация архипелага приводит к активизации сноса органического вещества и связанной с ним ртути [Kim et al., 2020].

В задачи исследования входило определение среднего содержания ртути в мерзлых четвертичных отложениях и возможных вариаций ее содержания по глубине в зависимости от типа отложений и количества органического углерода. Также ставилась задача сравнительного анализа полученных данных с опубликованными

ранее по Шпицбергену и другим районам результатами о содержании ртути в почвах и мерзлоте. Поскольку скважинами на Шпицбергене были вскрыты мерзлые морские позднеплейстоценовые и голоценовые отложения, отдельно ставилась задача сравнения содержания в них ртути с опубликованными данными о содержании ртути в современных донных грунтах фьордов Шпицбергена.

ПРИРОДНЫЕ УСЛОВИЯ ТЕРРИТОРИИ И ОБЪЕКТ ИССЛЕДОВАНИЙ

Подробно природные условия изучаемой территории рассмотрены в работе [Демидов и др., 2020]. Район исследований располагается на 78° с.ш. на арктическом арх. Шпицберген и ограничен частью Земли Норденшельда между долинами Грендален и Холлендар (рис. 1). Эти две глубоковрезанные долины придают пологозалегающим коренным породам горный рельеф. Абсолютные отметки вершин достигают 800 м над ур. моря. Среднегодовая температура воздуха по данным метеостанции «Баренцбург» в 2022 г. составила -2.5°C . Почвы на вершинах и горных склонах первичные и пустынно-арктические с сильно разреженными травянисто-мохово-лишайниковыми группировками. В долинах и на морских террасах распространены типично арктические и арктотундровые почвы под слабо Разреженными ивково-разнотравно-моховыми группировками.

В течение последнего столетия по причине потепления климата отмечается повсеместная деградация ледников западной части Земли Норденшельда; лишь в самых верховьях долин Грендален и Холлендар сохранились небольшие висячие и горно-долинные ледники. В геологическом отношении район приурочен к Западно-Шпицбергенскому грабенообразного прогибу. На поверхность здесь выходят осадочные породы палеогена в виде пачек чередующихся песчаников, алевролитов и аргиллитов. Четвертичные отложения представлены характерными для горных стран склоновыми, аллювиальными, флювиогляциальными и ледниковыми, а также морскими отложениями. Чехол четвертичных отложений за исключением участков развития таликов полностью проморожен. Вблизи береговой зоны мощность криогенных пород составляет около 100 м, увеличиваясь на водоразделах до 540 м. Среднегодовые температуры пород на подошве слоя годовых теплооборотов составляют от -3.6 до -2.2°C .

Объектом наших исследований являлись вскрытые скважинами (см. рис. 1, 2) мерзлые четвертичные отложения, слагающие лестницы аккумулятивных морских террас на южном берегу зал. Ис-фьорд (скв. 2, 3, 4, 5), террасу м. Финнесет (скв. 7), межгорные долины Грендален (скв. 8, 8а, 10, 11, 16, 17, 18, 19) и Холлендар (скв. 20), выполненные морскими, склоновыми и речными отложениями, а также многолетний бугор пучения в долине Грендален (скв. 9). Максимальная вскрытая мощность четвертичных отложений составляет 25 м – скв. 8а на террасе в долине Грендален.

В большинстве скважин верхняя часть разреза представлена грубообломочным материалом с преобладанием гравия, дресвы и гальки с суглинистым и

14°30' в.д.

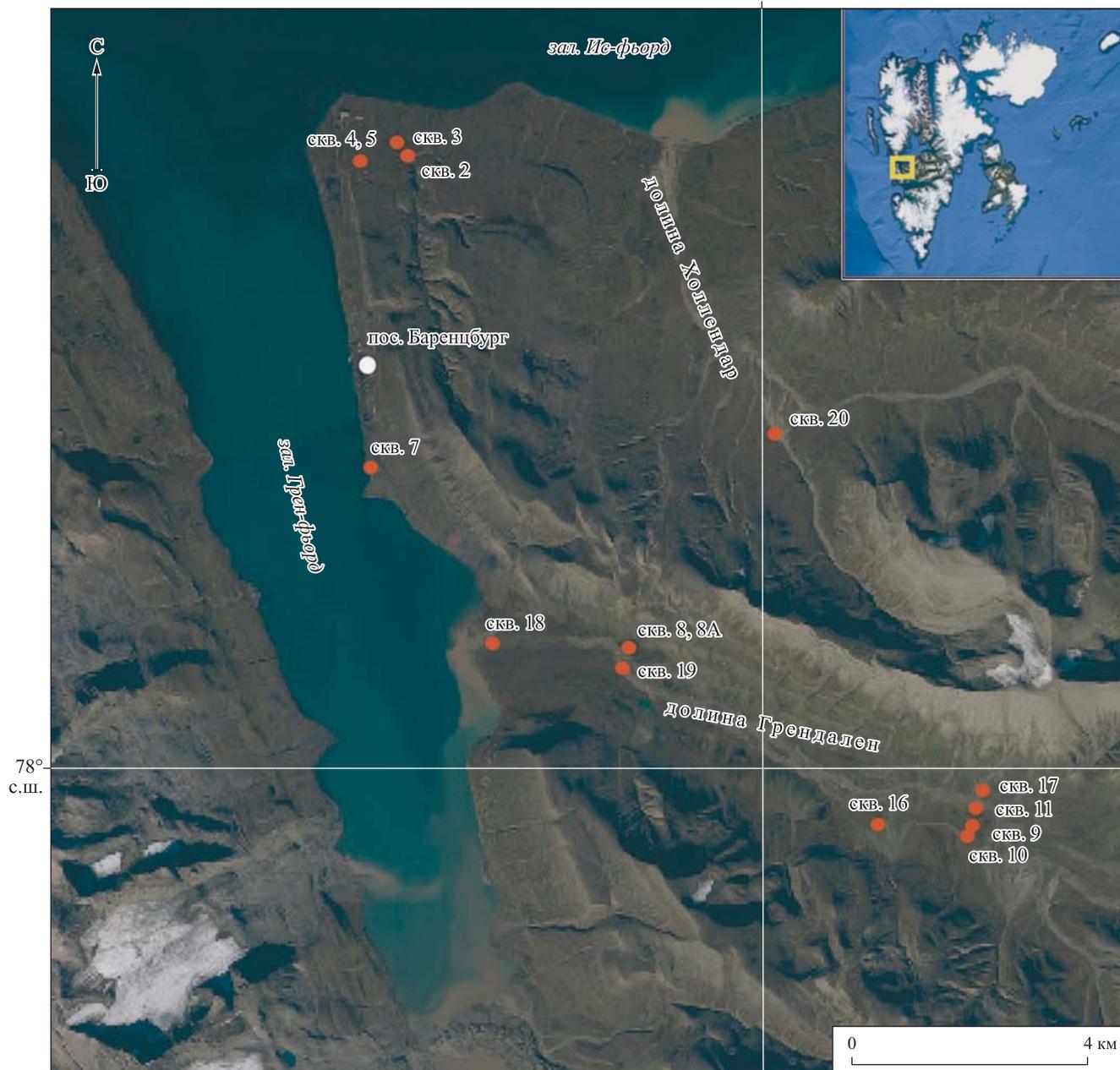


Рис. 1. Аэрофотоснимок района исследований с указанием мест бурения скважин (снимок с сайта Норвежского полярного института (<https://toposvalbard.npolar.no>) с доп.)

На врезке – местоположение исследуемого региона на территории арх. Шпицберген

супесчаным заполнителем или без него. В генетическом отношении отложения представляют собой продукты разрушения коренных пород и дальнейшей их переработки в условиях пляжа и речной переработки склоновых и флювиогляциальных отложений в долинах. Они характеризуются массивной криотекстурой. Средняя влажность отложений – 25 %.

Для низов скважин, слагаемых морскими отложениями, характерен преимущественно суглинистый состав. Криогенная текстура – шлировая, средняя влажность отложений – 38 %. По типу промерзания суглинистая пачка является эпикриогенной, а грубообломочная могла промерзнуть как по эпикриогенному, так и по

синкриогенному сценарию. Согласно результатам радиоуглеродного датирования образцов из отложений террасы на м. Финнесет, исследуемые отложения были сформированы в конце позднего плейстоцена – голоцене [Караевская и др., 2021а].

Поскольку вышеописанные четвертичные отложения образуются путем выветривания скальных грунтов, интерес представляло изучение содержания ртути в песчаниках, алевролитах, аргиллитах, слагающих коренное основание территории. Объектом изучения содержания ртути в скальных грунтах послужили образцы, отобранные в обнажениях на склонах долины Грендален.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЙ

Валовое содержание ртути в мерзлых отложениях определяли в химико-аналитической лаборатории РАЭ-Ш в пос. Баренцбург. После бурения мерзлые керны доставлялись в лабораторию, где их высушивали до воздушно-сухого состояния. Далее из пробы удаляли крупную гальку и щебень, после чего грунты измельчались в фарфоровой ступке и просеивались через сито 0.25 мм. Навеску измельченного образца с точностью до 0.002 г в лодочке из кварцевого стекла помещали в атомизатор. Атомизация содержащейся в пробе ртути осуществлялась в пиролизаторе приставки ПИРО-915+ с последующей транспортировкой полученных паров в аналитическую кювету. Условия атомизации: скорость прокачки воздуха составляла 0.8–1.2 л/мин, температура испарителя – 680–740 °С.

Содержание ртути определялось методом беспламенной атомной абсорбции с зеемановской коррекцией на анализаторе РА-915М («Льюмэкс», Россия). Каждая проба анализировалась минимум в двукратной повторности, расхождение между измерениями составляло не более 20 %. Интегрирование аналитического сигнала и расчет валового содержания ртути проводили с помощью программного обеспечения РАПИД. Градуировочный коэффициент получен с использованием стандартного образца состава почв СЧТ. Контроль стабильности градуировки проводили каждые 30 мин или перед каждой новой серией образцов. Анализы содержания ртути в скальных грунтах проводили по аналогичной методике.

Содержание органического углерода (ТОС – total organic carbon) определяли на элементном анализаторе Elementar VARIO MAX C в Институте Альфреда Вегенера Центра полярных и морских исследований им. Гельмгольца (Германия). Аналитическая точность измерений составляла ± 0.1 мас. %. Образцы предварительно высушивали с помощью лиофилизации, гомогенизировали, из них была удалена фракция более 2 мм.

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЙ

Результаты определения содержания ртути в вскрытых скважинами отложениях показаны на рис. 2. Каких-либо закономерностей в распределении ртути по глубине и в зависимости от принадлежности образцов к грубозернистой или тонкозернистой пачке пород не наблюдается. Существенного отличия по содержанию ртути между отложениями СТС и нижележащими мерзлыми отложениями не наблюдается. Если условно принять за глубину сезонного оттаивания отметку в 1.5 м [Демидов и др., 2016], то в отложениях СТС содержание ртути варьирует от 25 до 95 нг/г при среднем значении 45 нг/г по 23 образцам, а в нижележащих мерзлых отложениях – от 21 до 94 нг/г при среднем значении 40 нг/г по 157 образцам (рис. 3).

Было также проанализировано содержание ртути в 10 образцах скальных грунтов. Количество ртути в них оказалось значительно меньшим по сравнению с четвертичными отложениями – от 3 до 14 нг/г при среднем значении 8 нг/г.

В 19 образцах из СТС и 112 образцах из мерзлых отложений, в которых определялось содержание ртути, также выполнены анализы содержания органического

углерода (см. рис. 2). Среднее содержание органического углерода в СТС составляет 1.1 мас. % при разбросе значений от 0.3 до 2.4 мас. %. Среднее содержание органического углерода в мерзлых отложениях – 1.1 мас. %, а разброс значений – от 0.5 до 2.5 мас. %. Коэффициент парной линейной корреляции между содержанием ртути и количеством органического углерода для образцов из СТС составил -0.04 , а для образцов нижележащих мерзлых отложений – -0.05 . Отсутствие корреляции подтверждается хаотичным распределением точек на диаграмме рассеяния (рис. 4).

ОБСУЖДЕНИЕ ПОЛУЧЕННЫХ РЕЗУЛЬТАТОВ

Полученное в данной работе среднее содержание ртути в мерзлых отложениях Шпицбергена – 40 нг/г – оказывается в несколько раз выше среднего значения содержания ртути в мерзлых отложениях Якутии (9.7 нг/г), приведенного в работе [Rutkowski et al., 2021]. Сказать, с чем связано такое различие, на данном этапе работ пока невозможно. Одним из объяснений могло бы быть повышенное содержание органического углерода в мерзлоте арх. Шпицберген, однако концентрация органического углерода в исследованных нами образцах оказалась ниже, чем в образцах из работы [Rutkowski et al., 2021]. Следует также отметить, что ранее на Шпицбергене проводилась оценка содержания ртути в образцах минеральных почв, отобранных с глубин 20 см в долине Адвентдален и в районе пос. Нью-Олессун [Halbach et al., 2017]. Оно оказалось равным 25 нг/г, что меньше, чем среднее содержание ртути в СТС и мерзлых отложениях района пос. Баренцбург.

Сходные с полученными нами в СТС Шпицбергена концентрации ртути были получены ранее на Аляске при исследовании образцов из почв и подпочвенных отложений с глубин до 3 м, где среднее содержание ртути составило 43 нг/г [Schuster et al., 2018]. Среднее содержание ртути в трех исследованных мерзлых торфяниках Западной Сибири увеличивалось с широтой местности от 47 до 109 нг/г [Lim et al., 2020]. Содержание ртути в этих торфяниках оказывается значимо выше, чем в мерзлых отложениях Шпицбергена. При этом данное превышение не оказывается пропорциональным содержанию органического углерода. Содержание последнего в мерзлых торфяниках Сибири более чем на порядок выше, чем в мерзлоте Шпицбергена, тогда как превышение по ртути достигает лишь 2.5 раз.

Равномерное распределение ртути по глубине скважин свидетельствует об отсутствии закономерностей ее содержания в зависимости от фациальной обстановки осадконакопления. Следовательно, характер промерзания не оказывает влияние на содержание ртути в отложениях. Согласно сделанным ранее радиоуглеродным датировкам образцов из скв. 7 [Караевская и др., 2021а], отложения были сформированы в период морских изотопных стадий 1–2, а диапазон их возрастов превышает 10 тыс. лет. Следовательно, глобальная климатическая перестройка, произошедшая на рубеже плейстоцена и голоцена, также не повлияла на особенности накопления ртути в осадках Шпицбергена.

В работах предшественников была показана корреляция содержания ртути с органическим углеродом в

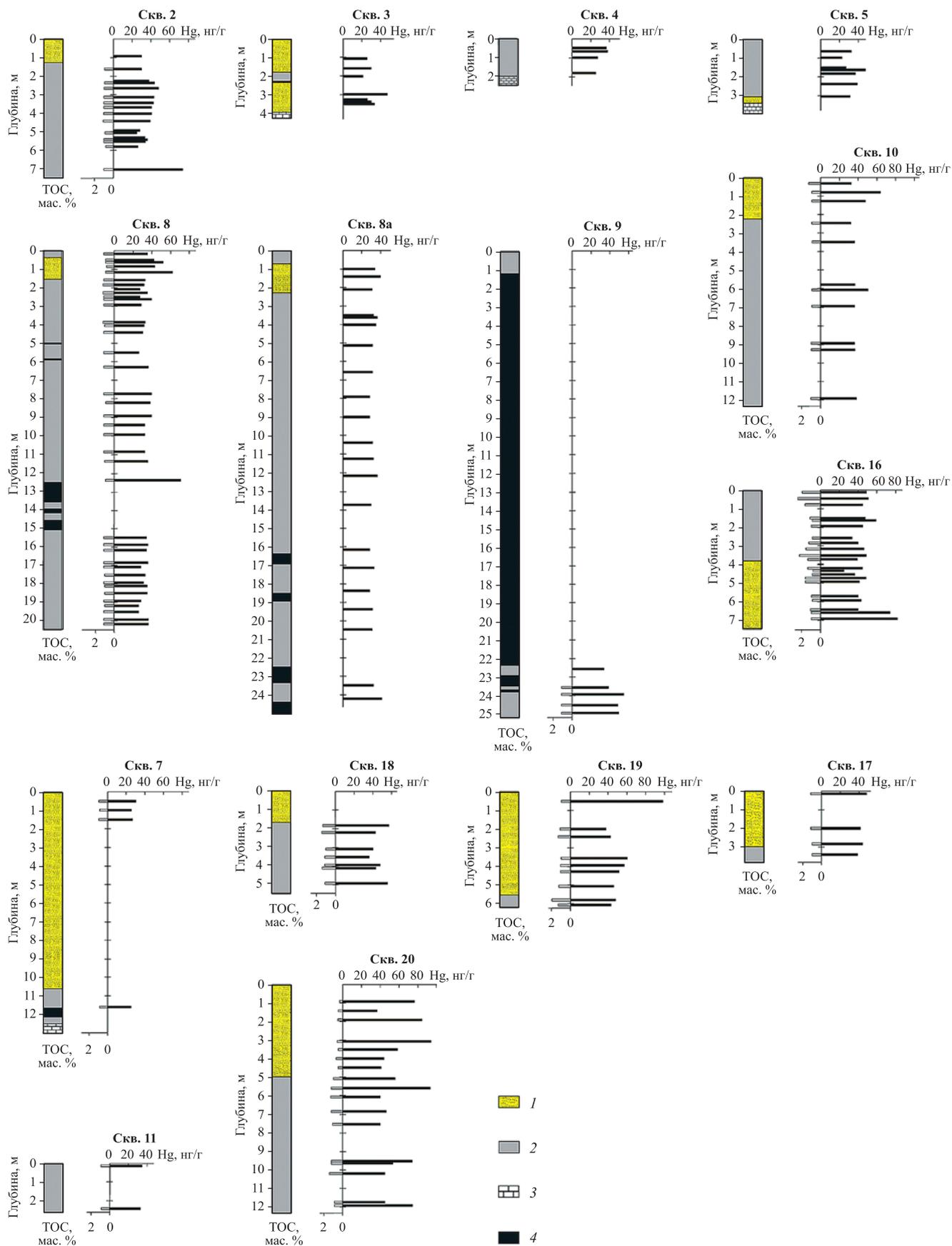


Рис. 2. Литологические колонки скважин и результаты определения содержания ртути и органического углерода (ТОС) в мерзлых отложениях исследуемого региона

1 – грубообломочные отложения с преобладанием гравия, дресвы и гальки с суглинистым и супесчаным заполнителем; 2 – суглинки, глины; 3 – скальный грунт; 4 – лед

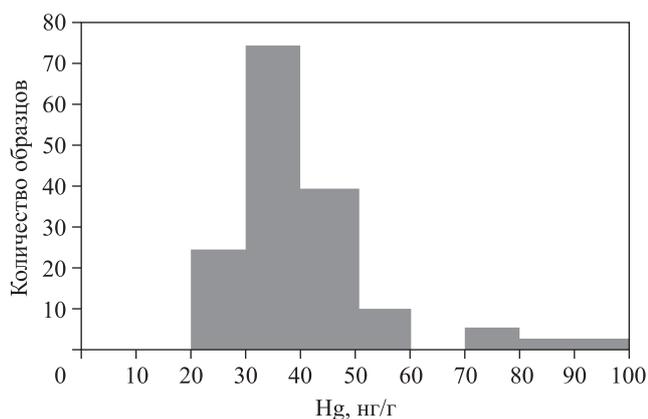


Рис. 3. Гистограмма измеренных значений содержания ртути в мерзлых четвертичных отложениях арх. Шпицберген

арктических почвах, донных отложениях и мерзлоте [Kim et al., 2020; Rutkowski et al., 2021; Tarbier et al., 2021]. В ряде работ, однако, данная корреляция обнаружена не была [Olson et al., 2018]. Отсутствие корреляции между содержанием ртути и количеством органического углерода в случае исследованных мерзлых отложений и СТС на Шпицбергене, возможно, связано с тем, что на фоне характерных для этих пород невысоких и выдержанных по величине содержаний органического углерода какие-то другие, неизвестные, факторы нивелируют данную зависимость. При этом выполненные анализы содержания ртути в коренных породах показали среднее значение 8 нг/г, что значительно меньше, чем в четвертичных отложениях. Таким образом, основная часть ртути поступила в исследуемые четвертичные отложения не из коренных пород при выветривании, а, вероятно, во время осадконакопления путем образования комплексов с органическим веществом или была адсорбирована на глинистых частицах.

Интерес представляет сравнительный анализ содержания ртути в исследованных нами мерзлых четвертичных отложениях морского генезиса и ее содержанием в современных морских донных грунтах Шпицбергена по литературным данным. В работе [Лебедева и др., 2018] измерения содержания ртути проводились в пяти пробах донных грунтов зал. Грен-фьорд, получен диапазон значений от 7.1 до 42.3 нг/г. В других фьордах Шпицбергена средние значения содержания ртути в донных грунтах составили: 52 нг/г – в Хорсунне, 30 нг/г – в Вийде-фьорде, 16 нг/г – в Диксон-фьорде [Kim et al., 2020] и 22 нг/г – в Конгс-фьорде [Jiang et al., 2011]. Только в Вийде-фьорде содержание ртути оказалось выше, чем в исследованных нами мерзлых четвертичных отложениях морского генезиса. Во всех остальных фьордах, включая Грен-фьорд, современные морские осадки характеризуются меньшим содержанием ртути, чем мерзлые морские доиндустриальные отложения МИС 1-2.

Таким образом, если мерзлые морские отложения МИС 1-2 в районе пос. Баренцбург являются характерными представителями доиндустриальных отложений для Шпицбергена, то проведенный сравнительный

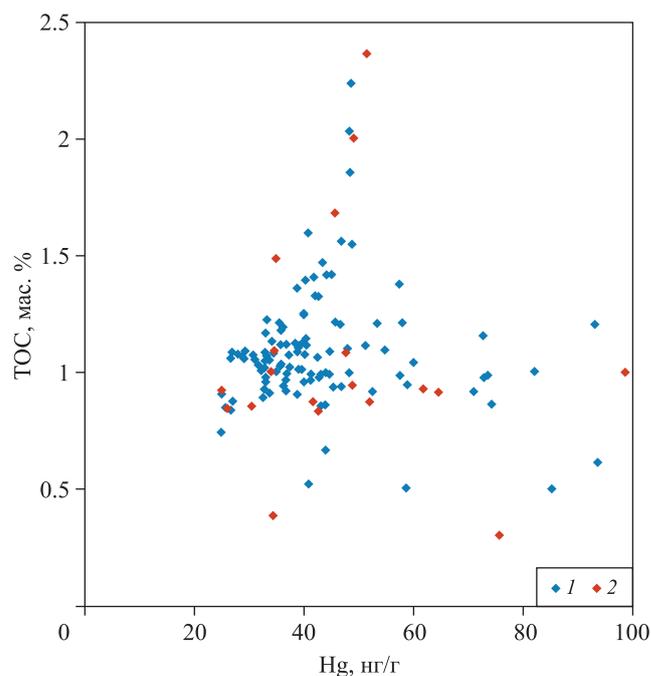


Рис. 4. Диаграмма рассеяния содержание ртути – содержание органического углерода в мерзлых отложениях (1) и СТС (2) региона исследований

анализ ставит под вопрос декларируемый в некоторых работах эффект повышения содержания ртути в современных морских донных грунтах архипелага, вызванный антропогенным загрязнением и дегляциацией.

ВЫВОДЫ

Содержание ртути в 157 проанализированных образцах из многолетнемерзлых четвертичных отложений в районе пос. Баренцбург (арх. Шпицберген) варьирует от 21 до 94 нг/г при среднем значении 40 нг/г. Отсутствие значимых различий содержания ртути в зависимости от геоморфологического положения скважин и равномерное распределение по глубине свидетельствует об отсутствии закономерностей в ее накоплении в зависимости от фациальной обстановки, времени образования осадка и характера промерзания. Корреляция содержания ртути с органическим углеродом отсутствует. При этом среднее содержание ртути в коренных породах составило 8 нг/г, что говорит о поступлении ртути в мерзлые четвертичные отложения во время осадконакопления путем образования комплексов с органическим веществом или путем абсорбции на глинистых частицах.

Сравнительный анализ полученных нами значений содержания ртути в мерзлых отложениях арх. Шпицбергена в районе пос. Баренцбург с опубликованными ранее данными показал следующее. Сходные концентрации ртути были получены на Аляске при исследовании образцов из почв и подпочвенных отложений с глубинами до 3 м. В мерзлых отложениях Шпицбергена ртути оказалось больше, чем в мерзлоте Якутии. Доиндустриальные морские мерзлые отложения в районе пос. Баренцбург содержат больше

ртути, чем современные донные грунты большинства фьордов Шпицбергена, включая Грен-фьод, на берегу которого располагается пос. Баренцбург.

БЛАГОДАРНОСТИ

Авторы выражают благодарность логистическому центру РАЭ-Ш за сопровождение полевых работ, сотрудникам химико-аналитической лаборатории РАЭ-Ш в пос. Баренцбург Н.Н. Фатееву, В.М. Михайловой, В.В. Бойко за определение содержания ртути в образцах, а также специалистам лаборатории углерода и азота Института Альфреда Вегенера Центра полярных и морских исследований (г. Потсдам, Германия) за проведение анализов содержания органического углерода.

КОНФЛИКТ ИНТЕРЕСОВ

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

ЛИТЕРАТУРА

- Демидов В.Э., Демидов Н.Э. Криогенные процессы, явления и связанные с ними опасности в районе российского рудника Баренцбург на архипелаге Шпицберген // ГеоРиск. 2019. Т. XIII, № 4. С. 48–62.
- Демидов Н.Э., Караевская Е.С., Веркулич С.Р., Никулина А.Л., Саватюгин Л.М. Первые результаты мерзлотных наблюдений на криосферном полигоне Российского научного центра на архипелаге Шпицберген (РНЦШ) // Проблемы Арктики и Антарктики. 2016. № 4. С. 67–79.
- Демидов Н.Э., Борисик А.Л., Веркулич С.Р., Веттерих С., Гунар А.Ю., Демидов В.Э., Желтенкова Н.В., Кошурников А.В., Михайлова В.М., Никулина А.Л., Новиков А.Л., Саватюгин Л.М., Сироткин А.Н., Терехов А.В., Угрюмов Ю.В., Ширрмейстер Л. Мерзлотно-гидрогеологические условия западной части Земли Норденшельда (арх. Шпицберген) // Геофизические процессы и биосфера. 2020. Т. 19, № 4. С. 68–93. <https://doi.org/10.21455/GPB2020.4-6>
- Караевская Е.С., Демидов Н.Э., Казанцев В.С., Елизаров И.М., Калошин А.Г., Петров А.Л., Карлов Д.С., Ширрмейстер Л., Белов А.А., Веттерих С. Бактериальные сообщества мерзлых четвертичных пород морского генезиса на побережье о. Западный Шпицберген // Геофизические процессы и биосфера. 2021а. Т. 20, № 2. С. 75–98. <https://doi.org/10.21455/GPB2021.2-5>
- Караевская Е.С., Демидов Н.Э., Казанцев В.С., Елизаров И.М., Калошин А.Г., Петров А.Л., Карлов Д.С., Ширрмейстер Л., Белов А.А., Веттерих С. Архейные сообщества мерзлых четвертичных пород морского генезиса на побережье о. Западный Шпицберген // Геофизические процессы и биосфера. 2021б. Т. 20, № 3. С. 20–38. <https://doi.org/10.21455/GPB2021.3-2>
- Лебедева Н.В., Фатеев Н.Н., Никулина А.Л., Зимина О.Л., Гарбуль Е.А. Ртуть в компонентах экосистемы заливов Западного Шпицбергена в летний период 2017 года // Проблемы Арктики и Антарктики. 2018. Т. 64, № 3. С. 311–325. <https://doi.org/10.30758/0555-2648-2018-64-3-311-325>
- Boike J., Juszak I., Lange S., Chadburn S., Burke E., Overduin P.P., Roth K., Ippisch O., Bornemann N., Stern L., Gouttevin I., Hauber E., Westermann S. A 20-year record (1998–2017) of permafrost, active layer and meteorological conditions at a high Arctic permafrost research site (Bayelva, Spitsbergen) // Earth System Science Data. 2018. V. 10. P. 355–390. <https://doi.org/10.5194/essd-10-355-2018>
- Christiansen H.H., Gilbert G.L., Neumann U., Demidov N., Guglielmin M., Isaksen K., Osuch M., Boike J. Ground ice content, drilling methods and equipment and permafrost dynamics in Svalbard 2016–2019 (PermaSval) // The state of environmental science in Svalbard–SESS rep. 2020. 2021. P. 259–275. <https://doi.org/10.5281/zenodo.4294095>
- Demidov N., Wetterich S., Verkulich S., Ekaykin A., Meyer H., Anisimov M., Schirrmeister L., Demidov V., Hodson A.J. Geochemical signatures of pingo ice and its origin in Grøndalen, West Spitsbergen // The Cryosphere. 2019. V. 13, N 11. P. 3155–3169. <https://doi.org/10.5194/tc-13-3155-2019>
- Demidov V., Wetterich S., Demidov N., Schirrmeister L., Verkulich S.R., Koshurnikov A., Gagarin V., Ekaykin A., Terekchov A., Veres A., Kozachek A. Pingo drilling reveals sodium–chloride – dominated massive ice in Grøndalen, Spitsbergen // Permafrost and Periglacial Processes. 2021. V. 32, N 4. P. 572–586. <https://doi.org/10.1002/ppp.2124>
- Demidov V., Demidov N., Verkulich S., Wetterich S. Distribution of pingos on Svalbard // Geomorphology. 2022. V. 412. P. 108326. <https://doi.org/10.1016/j.geomorph.2022.108326>
- Halbach K., Mikkelsen Q., Berg T., Steinnes E. The presence of mercury and other trace metals in surface soils in the Norwegian Arctic // Chemosphere. 2017. V. 188. P. 567–574.
- Jiang S., Liu X., Chen Q. Distribution of total mercury and methylmercury in lake sediments in Arctic Ny-Ålesund // Chemosphere. 2011. V. 83, N 8. P. 1108–1116. <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2011.01.031>
- Kim H., Kwon S.Y., Lee K., Lim D., Han S., Kim T., Joo Y., Lim J., Kang M., Nam S. Input of terrestrial organic matter linked to deglaciation increased mercury transport to the Svalbard fjords // Sci. Reports. 2020. V. 10. P. 3446. <https://doi.org/10.1038/s41598-020-60261-6>
- Lim A.G., Jiskra M., Sonke J.E., Loiko S.V., Kosykh N., Pokrovsky O.S. A revised pan-Arctic permafrost soil Hg pool based on Western Siberian peat Hg and carbon observations // Biogeosci. 2020. V. 17. P. 3083–3097. <https://doi.org/10.5194/bg-17-3083-2020>
- Olson C., Jiskra M., Biester H., Chow J., Obrist D. Mercury in active-layer tundra soils of Alaska: Concentrations, pools, origins, and spatial distribution // Global Biogeochem. Cycles. 2018. V. 32. P. 1058–1073. <https://doi.org/10.1029/2017GB005840>
- Rutkowski C., Lang J., Lang A., Wolter J., Mothes S., Reemtsma T., Grosse G., Ulrich M., Fuchs M., Schirrmeister L., Fedorov A., Grigoriev M., Lantuit H., Strauss J. Mercury in sediment core samples from deep Siberian icerich permafrost // Front. in Earth Sci. 2021. V. 9. P. 718153. <https://doi.org/10.3389/feart.2021.718153>
- Schaefer K., Elshorbany Y., Jafarov E., Schuster P., Striegl R., Wickland K., Sunderland E. Potential impacts of mercury released from thawing permafrost // Nature Communications. 2020. V. 11. P. 4650. <https://doi.org/10.1038/s41467-020-18398-5>

- Schuster P.F., Schaefer K.M., Aiken G.R., Antweiler R.C., Dewild J.F., Gryziec J.D., Zhang T. Permafrost stores a globally significant amount of mercury // *Geophys. Res. Lett.* 2018. V. 45. P. 1463–1471. <https://doi.org/10.1002/2017GL075571>
- Schuur E., McGuire A., Schädel C., Grosse G., Harden J.W., Hayes D.J., Hugelius G., Koven C.D., Kuhry P., Lawrence D.M., Natali S.M., Olefeldt D., Romanovsky V.E., Schaefer K., Turetsky M.R., Treat C.C., Vonk J.E. Climate change and the permafrost carbon feedback // *Nature*. 2015. V. 520. P. 171–179. <https://doi.org/10.1038/nature14338>
- Tarbier B., Hugelius G., Sannel A., Baptista-Salazar C., Jonsen S. Permafrost thaw increases methylmercury formation in Subarctic Fennoscandia // *Environ. Sci. & Technol.* 2021. V. 55. P. 6710–6717. <https://doi.org/10.1021/acs.est.0c04108>

Сведения об авторах

ДЕМИДОВ Никита Эдуардович – кандидат геолого-минералогических наук, Государственный научный центр «Арктический и антарктический научно-исследовательский институт». Россия, 199397, г. Санкт-Петербург, ул. Беринга, д. 38. E-mail: nikdemidov@mail.ru

ГУЗЕВА Алина Валерьевна – Государственный научный центр «Арктический и антарктический научно-исследовательский институт». Россия, 199397, г. Санкт-Петербург, ул. Беринга, д. 38; Институт озероведения РАН – Санкт-Петербургский федеральный исследовательский центр РАН. Россия, 195105, г. Санкт-Петербург, ул. Севастьянова, д. 9. E-mail: olina2108@mail.ru

НИКУЛИНА Анна Леонидовна – кандидат географических наук, Государственный научный центр «Арктический и антарктический научно-исследовательский институт». Россия, 199397, г. Санкт-Петербург, ул. Беринга, д. 38. E-mail: anikulina@aari.ru

ВЕТТЕРИХ Себастьян – доктор естественных наук, Институт Альфреда Вегенера Центра полярных и морских исследований им. Гельмгольца, отдел исследований вечной мерзлоты. Германия, 14473, г. Потсдам, Телеграфенберг, А45; Технический университет Дрездена, Институт географии. Германия, 01069, г. Дрезден, ул. Гельмгольца, д. 10. E-mail: sebastian.wetterich@awi.de

ШИРРМАЙСТЕР Лутц – доктор естественных наук, Институт Альфреда Вегенера Центра полярных и морских исследований им. Гельмгольца, отдел исследований вечной мерзлоты. Германия, 14473, г. Потсдам, Телеграфенберг, А45. E-mail: Lutz.Schirrmeister@awi.de

MERCURY IN PERMANENTLY FROZEN QUATERNARY DEPOSITS OF THE SPITSBERGEN ARCHIPELAGO

© 2023 N.E. Demidov^{1*}, A.V. Guzeva^{1,2}, A.L. Nikulina¹, S. Wetterich^{3,4}, L. Schirrmeister³

¹ Federal Scientific Center «Arctic and Antarctic Research Institute», St. Petersburg, Russia

² Institute of Limnology, Russian Academy of Sciences, – St. Petersburg Federal Research Centre of the Russian Academy of Sciences, St. Petersburg, Russia

³ Alfred Wegener Institute, Helmholtz Center for Polar and Marine Research, Department of Permafrost Research, Potsdam, Germany

⁴ Dresden University of Technology, Institute of Geography, Dresden, Germany

* e-mail: nikdemidov@mail.ru

Abstract. Climate warming-related degradation of permafrost can lead to the entry of climatically and biologically active substances, including mercury, into the biosphere. This work focuses on the analyses of the total content of mercury and organic carbon in 15 cores drilled in frozen Quaternary deposits of the Arctic Archipelago of Spitsbergen. The mercury content was additionally analyzed in bedrock samples as the studied Quaternary deposits are formed by weathering of the bedrock of the area. The results showed that mercury concentrations in 157 studied samples of frozen Quaternary deposits ranged from 21 to 94 ng/g, with an average value of 40 ng/g. The expected correlation of mercury content with organic carbon content was not revealed. There are no trends in the accumulation of mercury depending on the lithological facies, geomorphological position, the time of sedimentation and the freezing conditions. The average content of mercury in bedrock is relatively low with a mean value of 8 ng/g. This means that the main source of mercury in frozen Quaternary deposits is not bedrock, but the formation of organic matter complexes or sorption on clay particles. In terms of the ongoing discussion about mercury input from permafrost to ecosystems, the results obtained from boreholes can be considered as pre-industrial background values.

Keywords: mercury, permafrost, organic carbon, Spitsbergen.

About the authors

DEMIDOV Nikita Eduardovich – Cand. Sci. (Geol. and Miner.), Federal Scientific Center «Arctic and Antarctic Research Institute». Russia, 199397, St. Petersburg, Bering st., 38. E-mail: nikdemidov@mail.ru

GUZEVA Alina Valerevna – Federal Scientific Center «Arctic and Antarctic Research Institute». Russia, 199397, St. Petersburg, Bering st., 38; Institute of Limnology, Russian Academy of Sciences, – St. Petersburg Federal Research Centre of the Russian Academy of Sciences. Russia, 195105, St. Petersburg, Sevastiano-va st., 9. E-mail: olina2108@mail.ru

NIKULINA Anna Leonidovna – Dr. (Nat. Sci.), Federal Scientific Center «Arctic and Antarctic Research Institute». Russia, 199397, St. Petersburg, Bering st., 38. E-mail: anikulina@aari.ru

WETTERICH Sebastian – Dr. (Nat. Sci.), Alfred Wegener Institute, Helmholtz Center for Polar and Marine Research, Department of Permafrost Research. Germany, 14473, Potsdam, Telegrafenberg, A45; Dresden University of Technology, Institute of Geography. Germany, 01069, Dresden, Helmholtz st., 10. E-mail: sebastian.wetterich@awi.de

SCHIRRMEISTER Lutz – Dr. (Nat. Sci.), Alfred Wegener Institute, Helmholtz Center for Polar and Marine Research, Department of Permafrost Research. Germany, 14473, Potsdam, Telegrafenberg, A45. E-mail: Lutz.Schirrmeister@awi.de

Cite this article as: Demidov N.E., Guzeva A.V., Nikulina A.L., Wetterich S., Schirrmeister L. Mercury in permanently frozen Quaternary deposits of the Spitsbergen archipelago, *Geofizicheskie Protsestry i Biosfera* (Geophysical Processes and Biosphere), 2023, vol. 22, no. 2, pp. 134–142 (in Russian). <https://doi.org/10.21455/gpb2023.2-6>

English version: *Izvestiya, Atmospheric and Oceanic Physics*, 2023, vol. 59, iss. 8. ISSN: 0001-4338 (Print), 1555-628X (Online). <https://link.springer.com/journal/volumesAndIssues/11485>