

УДК 553.24.552.14:552.46:550.86

ВЛИЯНИЕ ГИДРОТЕРМАЛЬНОЙ АКТИВНОСТИ НА КАРБОНАТНЫЕ МИКРОФОССИЛИИ В ДОННЫХ ОСАДКАХ ТРОПИЧЕСКОЙ АТЛАНТИКИ

© 2015 г. И. Ф. Габлина¹, О. Б. Дмитренко², Н. С. Оськина², Т. А. Хусид², Е. А. Попова³

¹Геологический институт РАН, Москва

e-mail: gablina@ilran.ru

²Институт океанологии им. П.П. Ширшова РАН, Москва

e-mail: senidol@yandex.ru

³ВНИИ Океангеология, Санкт-Петербург

Поступила в редакцию 19.06.2013 г.

Исследованы химический и минеральный состав донных осадков, комплексы планктонных, бентосных фораминифер и наннопланктона из двух колонок, поднятых в Северной Атлантике в районе гидротермального рудного поля Петербургское и за его пределами. Выделены осадки голоцена и позднего плейстоцена, их граница в обеих колонках располагается на уровне 20 см. Определены температуры поверхностных вод, которые фиксируют смену тропических условий в голоцене на субтропические в верхнем плейстоцене. Установлено существенное влияние гидротермальных флюидов на биогенные карбонатные осадки в зоне рудообразования поля Петербургское (ст. 33л159), выраженное в растворении раковин микрофоссилий и замещении их гидротермальными минералами. Характер изменений и их вертикальная зональность свидетельствуют о поступлении кислых диффузных растворов в осадки снизу. В фоновых осадках, изученных по колонке ст. 33л148 (в 5 км от рудного поля), раковины микрофоссилий имеют хорошую сохранность по всему разрезу. В основании колонки отмечено слабое воздействие кислой агрессивной среды, выраженное в исчезновении остатков птеропод, изменении численности и видового состава бентосных фораминифер и наннофоссилий. Эти данные могут быть использованы в качестве поискового критерия, т.к. указывают на возможность нахождения поблизости активных гидротермальных источников.

DOI: 10.7868/S0030157415010050

ВВЕДЕНИЕ

Карбонатные остатки планктонных и бентосных микроорганизмов, имеющих широкое распространение в Атлантическом океане, достаточно хорошо изучены. Однако в гидротермально активных районах кислые растворы оказывают на них негативное воздействие в процессе захоронения. Впервые детальные исследования рудоносных осадков голоцена и верхнего плейстоцена по микробиоте были проведены в районе рудного поля Ашадзе-1 на 13° с.ш. Срединно-Атлантического хребта (по материалам 26-го рейса НИС “Профессор Логачев”, 2005 г.) [4]. Было выявлено влияние гидротермальных процессов на распространение и сохранность планктонных карбонатных организмов и на видовой состав бентосных фораминифер в голоценовых биогенных осадках. Установлено, что под воздействием гидротермальных флюидов происходит метасоматическое замещение биогенного кальцита различными, в том числе и рудными, гидротермальными минералами. Происходят изменения в составе и струк-

туре скелетов фораминифер вплоть до полного их замещения и исчезновения. Настоящая работа является продолжением исследований в этом направлении. Комплексные литологические и микрорепалеонтологические работы позволяют изучить воздействие гидротерм на облик осадков и заключенных в них остатков микроорганизмов, проследить степень этого влияния на разные группы микробиоты по площади и во времени. Полученные результаты могут быть использованы в качестве дополнительных критериев при поисках и разведке полиметаллических сульфидных руд на дне океана.

МАТЕРИАЛ И МЕТОДЫ

Исследованы химический и минеральный состав осадков, комплексы планктонных, бентосных фораминифер и наннопланктона из двух колонок, поднятых телевизионным грейфером (ТВГ) в районе гидротермального рудного поля Петербургское Северной Атлантики (ст. 33л159) и коробчатым пробоотборником (КП) за его преде-

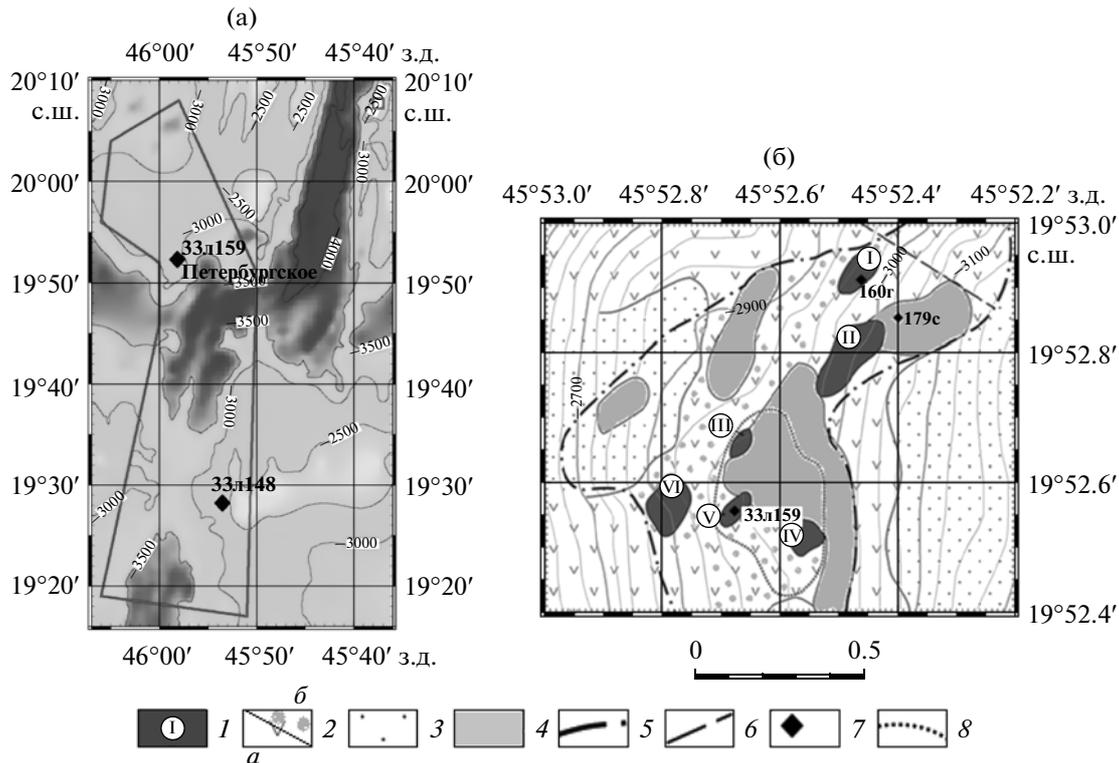


Рис. 1. Район работ НИС “Профессор Логачев” в рейсе № 33. Расположение станций 33л159 и 33л148 в пределах контура работ (а) и схема строения гидротермального поля Петербургское (б).

1 – рудные тела и их номера; 2 – толалитовые базальты: а – выходящие на поверхность дна, б – частично перекрытые осадками; 3 – кокколито-фораминиферовые илы; 4 – металлоносные осадки; 5 – предполагаемый контур гидротермального рудного поля; 6 – тектонические нарушения; 7 – станции ТВГ; 8 – контур поднятия (предполагаемого рудного холма).

лами (ст. 33л148) в 33-м рейсе НИС “Профессор Логачев” в 2010 г. (рис. 1).

Химический анализ осадков проведен методом мокрой химии в химической лаборатории ФГУП “ВНИИОкеангеология им. И.С. Грамберга”. Минералогические исследования проводились с помощью оптического и электронного (CamScan MV2300 с встроенной энергодисперсионной аналитической системой INCA Energy 200, ГИН РАН) микроскопов. Глинистая фракция была изучена методом рентгеновской дифракции (дифрактометр D8 ADVANCE, ГИН РАН, аналитик Е.В. Покровская). Идентификация минералов более крупных фракций после изучения их оптических свойств и состава проводилась М.А. Яговкиной с помощью рентгенофазового анализа в Региональном ЦКП г. Санкт-Петербурга “Материаловедение и диагностика в передовых технологиях” на дифрактометрической системе D/max-RC фирмы Rigaku, Япония, при финансовой поддержке министерства образования и науки. При расшифровке фазового состава использовались оригинальные программы фирмы Rigaku. Микрофотографии фракций осадков выполнены в Институте океанологии им. П.П. Шир-

шова РАН на бинокулярном микроскопе Leica M165C.

При изучении планктонных, бентосных фораминифер и наннопланктона был применен биостратиграфический и палеотемпературный методы. Планктонные фораминиферы исследованы в световом микроскопе Leica с увеличением в несколько десятков раз. Была просмотрена фракция 0.1–0.25 мм и проведен подсчет встреченных видов с целью реконструкции палеотемператур по комплексам. Фракция 0.25–0.5 мм использовалась для полного выявления всех видов, особенно имеющих стратиграфическое значение. Подсчитывалось также количество экземпляров раковин планктонных фораминифер на грамм сухого осадка для оценки продуктивности.

Бентосные фораминиферы исследовались под микроскопом МБИ-2 в гранулометрических фракциях осадка 0.5–0.25 и 0.25–0.1 мм. Суммарная численность раковин рассчитана на 1 г осадка. Для характеристики придонной обстановки оценивалось относительное содержание видов в процентах для всей ассоциации.

Наннофоссилии изучены в световом биологическом микроскопе “Amplival” с увеличением до 1350 раз в 53 пробах и в 25 образцах — в сканирующем электронном микроскопе TE SCAN VEGA 3 с увеличением до 20000 раз. Было получено около 100 фотографий. Оценка общих количеств кокколлитов в световом микроскопе давалась, исходя из присутствия их в поле зрения: “редко” — несколько на препарат, “мало” — несколько в поле зрения, “обычно” (“средне”) — десятки в поле зрения, “много” — сотни в поле зрения, “масса” — сплошные кокколлиты без примеси постороннего материала. Подсчет кокколлитов (в сумме 300 экз.) позволил выявить доминирующие виды, проанализировать процентные соотношения в ассоциациях, исследовать различия в их структуре и установить биостратиграфическую принадлежность осадков.

ХАРАКТЕРИСТИКА РАЙОНА РАБОТ

Район исследований расположен в северной тропической зоне Срединно-Атлантического хребта на 19° – 20° с.ш. Одна из колонок (33л159) отобрана телеграфом на глубине 2960 м в пределах рудного тела V ($19^{\circ}52'$ с.ш., $45^{\circ}52'$ з.д.), сложенного Fe–Cu сульфидными рудами и рудоносными осадками гидротермального поля Петербургское (рис. 1). Гидротермальное поле Петербургское ($19^{\circ}52'$ с.ш. САХ, глубины 2800–3100 м), открытое в рейсе № 33 НИС “Профессор Логачев” в 2010 г., находится на выровненном участке южного замыкания террасы, расположенной во второй гряде западного борта рифтовой долины, на границе с крупным нетрансформным разломом $19^{\circ}47'$ с.ш. Поле вытянуто вдоль склона на 1400 м, имеет ширину 800 м и состоит из 6 мелких (от 50×100 м до 100×280 м) рудных тел. Одно из рудных тел — V (ст. 33л159) представлено богатыми медными рудами; рудные тела I, II, III и IV — железо-марганцевыми образованиями, рудоносными и металлоносными осадками. Рудное тело VI установлено по данным электроразведки. Рудные тела окружены карбонатными отложениями с вскрытой мощностью до 150 см, состоящими из птероподовых, фораминиферовых, кокколлитово-фораминиферовых, фораминиферо-кокколлитовых илов и песков, в основании нередко с эдафогенным материалом. Осадки залегают на гидротермально измененных базальтах [5, 11].

Вторая колонка (33л148) отобрана коробчатым пробоотборником из карбонатных фоновых — неизмененных осадков в 5 км южнее рудного поля ($19^{\circ}28'$ с.ш., $45^{\circ}53'$ з.д., глубина 2623 м) на террасе восточного склона рифтовой долины. Мощность карбонатных отложений в данном секторе САХ не превышает 1.53 м, рудоносных — 0.5–0.6 м.

Станции расположены в олиготрофной, бедной пищевыми ресурсами области Атлантического океана в районе антициклональной халистазы, где в поверхностных водах отмечен чрезвычайно низкий уровень биологической продуктивности [6]. Это зона распространения холодных соленых Северо-Атлантических глубинных вод (САГВ), которые выше 3000 м содержат большое количество кислорода, а ниже его содержание падает до минимума на глубине около 4000 м [9, 10].

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЙ

Литолого-минералогическая характеристика осадков. Колонка 33л148 вскрыла разрез осадков мощностью 150 см. Осадки представлены бежевыми карбонатными фораминиферо-кокколлитовыми илами. В верхней части, в интервалах 9–15 см, 24–27 см, и в интервале 75–76 см в них наблюдаются птероподовые прослои, глубже 50 см присутствуют микровключения черного цвета, у подошвы колонки на глубине 143–150 см отмечен прослой эдафогенного материала.

Осадки ст. 33л159 общей мощностью 34 см подняты телевизионным грайфером вместе с сульфидными рудами. В интервале 0–14 см осадки представлены карбонатными фораминиферо-кокколлитовыми и кокколито-фораминиферовыми илами и песками бежевого цвета с редкими черными микровключениями. В верхней части (до 10 см) отмечаются фрагменты птеропод. Ниже 14 см биогенные отложения сменяются металлоносными карбонатными красновато-бурыми осадками, на глубине 22 см — рудоносными бескарбонатными осадками темно-бурого, а глубже 28 см черного цвета. Металлоносные и рудоносные осадки на 85–90% состоят из зерен фораминиферовой размерности (0.1–0.5 мм) округлой, шарообразной, неправильно изометричной формы, сложенных гидротермальными минералами, которые иногда сохраняют форму замещенных раковин фораминифер (рис. 2). В подошве колонки (28–34 см) вскрыты разложенные до глинистого состояния и обогащенные сульфидами базальты. Гидротермальные изменения осадков наблюдаются как в нижней части колонки, так и в зоне шириной 30–50 см вокруг рудной постройки: осадки замещены гидроксидами железа, хлоритом, имеют яркую пятнистую окраску (красно-бурые и зеленые пятна). На поверхности дна при телепрофилеировании эти зоны наблюдаются в виде бурых пятен на фоне неизмененных бежевых осадков.

Изучены химический и минеральный состав гидротермально-измененных осадков поля Петербургское (табл. 1) и фоновых донных осадков ст. 33л148. На рис. 3 видно, что фоновые и гидротермально-измененные осадки существенно различаются по содержанию CaCO_3 , рудообразующих и малых элементов. В околорудно-изменен-

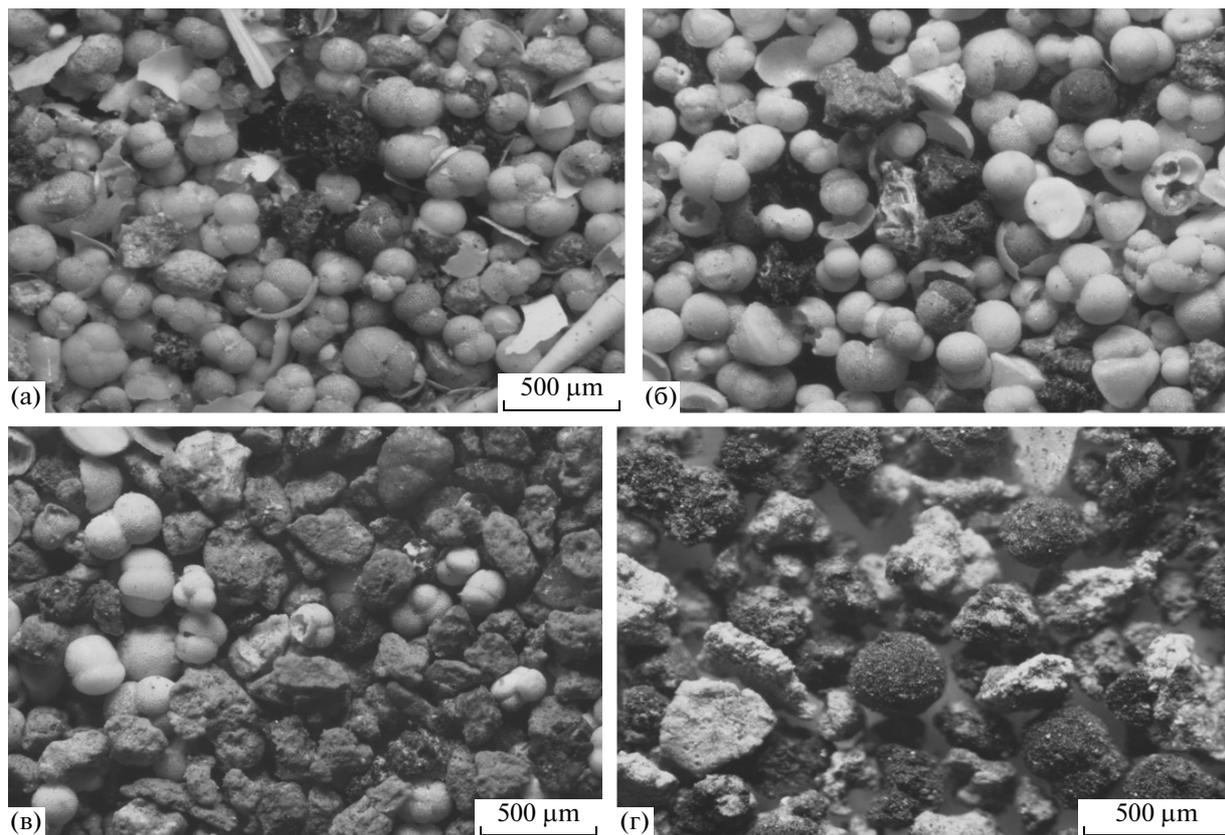


Рис. 2. Характер изменения осадков с глубиной по колонке 33л159. Микрофотографии фракции 0.25–0.5 мм.

(а) – инт. 2–5 см, карбонатный осадок с единичными зернами гидроксидов железа, фракция представлена преимущественно раковинами фораминифер, в меньшей степени обломками птеропод; (б) – инт. 19–22 см, то же, с зернами атакамита, гидроксидов железа, отдельными псевдоморфозами гидротермальных минералов по раковинам фораминифер; (в) – инт. 22–24 см, рудоносный осадок, резкое преобладание зерен, сложенных гидротермальными минералами, присутствуют отдельные фораминиферы хорошей сохранности; (г) – инт. 26–28 см, рудоносный осадок, сложенный зернами гидротермальных минералов, некоторые из них сохранили форму замещенных одно- двух- и четырехкамерных планктонных фораминифер.

ных осадках поля Петербургского (ст. 33л159) содержание CaCO_3 резко снижается, а рудообразующих элементов и серы возрастает вниз по разрезу. Это свидетельствует об усилении влияния рудоносных гидротермальных растворов в этом направлении и отражается на минеральном составе осадков: сверху вниз постепенно снижается количество, а с глубины 22 см полностью исчезает биогенный кальцит, увеличивается доля кварца, железистого опала, гетита, силикатных минералов. В верхней части колонки рудные минералы редки и представлены гидроксидами железа, атакамитом, а в нижней ее части наряду с гетитом и паратакамитом в значимых количествах присутствуют пирит, сульфиды меди (табл. 1).

Планктонные фораминиферы. В обеих колонках содержатся раковины планктонных фораминифер хорошей сохранности. Видовой состав их комплексов обычный для этих широт, признаков переотложения нет. Встречено более 30 видов (до 25 в каждой пробе), относящихся к экваториаль-

но-тропической, тропической, субтропической, умеренной группам, и один субполярный вид (*Neogloboquadrina pachyderma* sin).

Количественный показатель – экземпляры/г сухого осадка (табл. 2), отражающий продуктивность планктонных фораминифер, в колонке 33л148 менялся в очень широких пределах: от 7300 экз/г сухого осадка на уровне 20–24 см до 204800 экз/г сухого осадка – на 127–130 см. В колонке 33л159 этот показатель менялся меньше: от 3500 до 18200 экз/г сухого осадка, что объясняется значительно меньшей длиной этой колонки.

На основании совместного применения палеотемпературного и биостратиграфического методов в обеих колонках удалось провести стратиграфическое расчленение осадков и определить положение голоцен-плейстоценовой границы. Для этого использовался уровень последнего присутствия в колонках экваториально-тропических видов *Globorotalia menardii flexuosa* и *Globoquadrina hexagona*, которые в Атлантическом оке-

Таблица 1. Минеральный состав донных осадков поля Петербургское вблизи рудных построек (ст. 33л159) по данным оптической микроскопии, электронно-зондового и рентгеновского анализа

№ п/п	№ пробы	Интервал, см	Минеральный состав (по убыванию)	
			Фракций > 0.1 мм	Глинистой фракции, <0.005 мм
1	159–1	2–10	Кальцит биогенный, арагонит, тальк, гетит, атакамит, железистый опал, гидроксиды Mn	Кальцит, каолинит, кварц, слюда, хлорит+сметит (следы)
2	159–2	10–15	Кальцит биогенный, арагонит, кварц, железистый опал, гетит, углеродистое вещество	Кальцит, кварц, каолинит, слюда, смектит, хлорит, палыгорскит (следы)
3	159–3	16–22	Кальцит биогенный, кварц, железистый опал, арагонит, гетит, тальк, хлорит(?)	
4	159–4	22–28	Хлорит, серпентин, гетит, гематит, клинохлор, кварц, клиноатакамит, железистый опал, пирит, доломит, сульфиды меди, углеродистое вещество	Кварц, слюда, смектит, хлорит

ане вымерли в самом конце плейстоцена [2]. В обеих колонках эта граница определена на уровне 20 см. В более длинной колонке 33л148 были выявлены горизонты отложений, сформировавшиеся в течение голоцена, последнего оледенения и последнего межледниковья (табл. 2). В колонке 33л159 удалось выделить только горизонты голоцена и конца плейстоцена (табл. 2).

Палеотемпературный анализ комплексов планктонных фораминифер показал, что в течение времени формирования исследованных осадков среднегодовая температура поверхностной воды в районах станций менялась в пределах нескольких градусов. В районе станции 33л148 она варьировала от 21 до 24.5°C, на ст. 33л159 – от 24.5 до 26.5°C (табл. 2) при современной среднегодовой температуре 24.5 и 25°C соответственно.

Отсутствие резких температурных колебаний при образовании разреза ст. 33л159, несомненно, связано с его малым стратиграфическим диапазоном, охватывающим только голоценовую (20 см) и верхнеплейстоценовую (до 24 см) части разреза, ниже которых фораминиферы в осадках представлены единичными экземплярами, что не позволяет оценить палеотемпературы для более ранних этапов плейстоцена. Судя по температурам в районе станции 33л148, в плейстоцене существовали условия, характерные для южной части субтропической зоны, в отличие от тропических – современных и голоценовых [1].

Бентосные фораминиферы. В колонке 33л148 бентосные фораминиферы обнаружены на всем протяжении разреза (табл. 3). Их численность отчет-

ливо меняется по разрезу. В верхнем слое 0–40 см обнаружено чрезвычайно низкое их количество, не превышающее 1–2 экз/г, что характерно для данного обедненного района [8]. В проанализированных пробах, составлявших около 5 г осадков, содержалось не более 27 экз, что не позволяет говорить о структуре бентосной ассоциации, а только о видовом составе фораминифер. В нижней части колонки (от 40 см до подошвы) суммарное число раковин постоянно превосходит 10 экз/г, достигая 40–46 экземпляров в интервале 90–100 см и 10–26 – в нижнем горизонте 104–150 см (табл. 3).

Видовой состав бентосных фораминифер (табл. 3) на протяжении всей колонки характерен для нижнебатиального сообщества Атлантического океана [8]. Распространены *Quinqueloculina venusta*, *Q. weaveri*, *Pyrgo murrhina*, *Fontbotia wuellerstorfi*, *Virgulina complanata*, *Globocassidulina subglobosa*, на долю каждого из которых приходится от 5 до 20, редко до 30%. В ассоциации нижнего горизонта колонки (104–150 см) кроме перечисленных видов небольшую роль играет *Osangularia culter*.

В колонке 33л159 бентосные фораминиферы обнаружены только в верхнем интервале до 24 см (табл. 3). В карбонатном слое 0–15 см видовой состав бентосных фораминифер типичный для нижнебатиального сообщества Атлантического океана: *Quinqueloculina venusta*, *Q. weaveri*, *Pyrgo murrhina*, *Fontbotia wuellerstorfi*. Наряду с ними активную роль играют абиссальные виды *Epistominella exigua*, *Oridorsalis umbonatus* и *Globocassidulina subglobosa*, именно эти виды играют главную роль в металлоносных осадках слоя 15–22 см ко-

лонки. В интервале 19–22 см к ним присоединяется *Nuttalides bradyi*, развитый во всех океанах. Обычно роль этого вида возрастает до доминирующей вблизи критической глубины карбонатнакопления [3, 13, 15, 16]. Для горизонта 15–24 см характерно присутствие ожелезненных раковин, особенно многочисленных в его нижней части на уровне 22–24 см, где число раковин хорошей сохранности минимальное, около 1 экз/г. На поверхности некоторых из них на протяжении всей колонки наблюдаются черные точки гидроксидов Mn. Число раковин бентосных фораминифер в верхних, карбонатных горизонтах значительно больше и составляет несколько десятков экземпляров на грамм осадка. Глубже 24 см в рудоносных осадках фораминиферы уже не встречены (табл. 3), осадок представлен неправильно-изометричными зернами бурого, реже зеленого цвета фораминиферовой размерности (0.1–0.5 мм), сложенными гидроксидами железа, атакамитом, силикатными минералами, пиритом, сульфидами меди (табл. 3). Видовой состав бентосных фораминифер и облик их раковин показывает, что донные условия в разрезе колонки 33л159 существенно менялись. В верхней части разреза придонные условия были вполне типичными для абиссальных областей океана. Ниже горизонта 15 см условия характеризуются большей агрессивностью. Интенсивная агрессивность придонных вод отмечена в горизонте 19–22 см, глубже карбонатные раковины фораминифер не сохраняются, что, по-видимому, связано с их растворением и замещением рудным веществом.

Наннофоссилии. Колонка 33л148 вскрыла разрез длиной 150 см. Осадки представлены бежевыми карбонатными илами, в которых содержатся кокколиты хорошей сохранности в средних и больших количествах. Разнообразие, достаточно стабильное по разрезу, меняется в основном от 19 до 21 вида, несколько увеличиваясь в верхнем (0–24 см) и нижних (от 123 см) горизонтах (рис. 4а).

Во всем разрезе в значительных количествах присутствует вид *Emiliania huxleyi*, определяя одноименную зону верхнего плейстоцена-голоцена [14, 17, 18], возраст нижней границы которой 0.20–0.27 млн. лет. Содержание кокколитов вида-индекса составляет в основном >12%, поднимаясь до 19–25% в трех верхних образцах. От 7 до 18% составляют мелкие формы, среди которых развиты виды *Gephyrocapsa* – *G. aperta* и *G. sinuosa*. Определен полный набор субтропических и тропических видов, выровненные процентные содержания которых свидетельствуют о тропической обстановке поверхностной водной среды. По всему разрезу присутствуют тепловодные виды родов *Umbellosphaera* – *U. irregularis* и *U. tenuis* (подсчитаны вместе), *Discosphaera tubifera*, *Oolithothus antillarum* и единичные *O. fragilis*, *Hayaster perplexus*. Последний является видом-индикатором тропических условий в позднем плейстоцене-голоцене. Умбиликосферы более многочисленны в верхней части разреза, где присутствует также *Ceratolithus cristatus*. Многочисленные субтропические виды широкого географического распространения – *Calcidiscus leptoporus*, *Helicosphaera* spp. (в основном *H. carteri*, подсчитана с редкими *H. inversa* и *H. hyalina*), *Rhabdosphaera clavigera* несколько увеличивают содержание в нижней части разреза от горизонта 60 см (рис. 4а). Следует отметить хорошую сохранность кокколитов по всему разрезу и практически незначительные изменения общей их численности и видового состава, что может свидетельствовать о полном отсутствии воздействия на эту группу организмов рудных источников, по крайней мере, во время образования верхних 50 см разреза. Небольшое негативное влияние, возможно, связанное с гидротермальной деятельностью, отражалось на состоянии вида *Oolithothus antillarum*, что приводило к образованию вторичных кристаллов на его поверхности.

Колонка 33л159 длиной 34 см, поднятая с глубины 2960 м, находится в пределах рудного поля.

Рис. 3. Графики распределения химических элементов и карбонатности (CaCO_3 , %) в осадках: (а) – в фоновых осадках (ст. 33л148), (б) – в околорудно-измененных (ст. 33л159, поле Петербургское). Содержания элементов (на бескарбонатное вещество) в вес. %, Ag – г/т:

(а): 1 – сильно карбонатный (>70% CaCO_3), кокколитово-фораминиферо-птероподовый, бежевый песок; 2 – сильно карбонатный, кокколитово-фораминиферо-птероподовый, бежевый песчаный пелит с прослоями птероподового серо-бежевого ила с пятнами биотурбации; 3 – сильно карбонатный фораминиферо-коккелитовый, коричневато-бежевый пелитовый ил с примесью песка и алеврита; 4 – сильно карбонатный фораминиферо-коккелитовый, коричневато-бежевый пелитовый ил с примесью песка и алеврита, с прослоями птероподового детрита; 5 – карбонатный фораминиферо-коккелитовый, коричневато-бежевый пелит с примесью алеврита и песка с микровключениями эдафогенного материала; 6 – переслаивание сильно карбонатного фораминиферо-коккелитового пелитового ила светло-бежевого и светло-коричневого цветов с примесью алеврита и эдафогенного материала.

(б): 1 – металлосодержащий ($\text{Fe}_{\text{окв}} < 10\%$, $[\text{Cu} + \text{Zn}]_{\text{окв}} \geq 0.25\%$) карбонатный (50–70% CaCO_3), кокколитово-фораминиферо-птероподовый, серовато-бежевый алеврито-печаный ил с детритом птеропод, примесью пелита, на поверхности – Fe–Mn корки; 2 – рудосодержащий ($\text{Fe}_{\text{окв}} > 10\%$, $[\text{Cu} + \text{Zn}]_{\text{окв}} \geq 0.25\%$) сильнокарбонатный (>70% CaCO_3) фораминиферо-птероподовый, бежевый с детритом птеропод; 3 – рудосодержащий карбонатный, коричневый (в верхней части слоя – оранжевый) песчаный ил с примесью пелита; 4 – рудосодержащий бескарбонатный (<10% CaCO_3) комковатый бурый алеврито-печаный с примесью пелита осадок; 5 – рудоносный бескарбонатный черный осадок с включениями сульфидов.

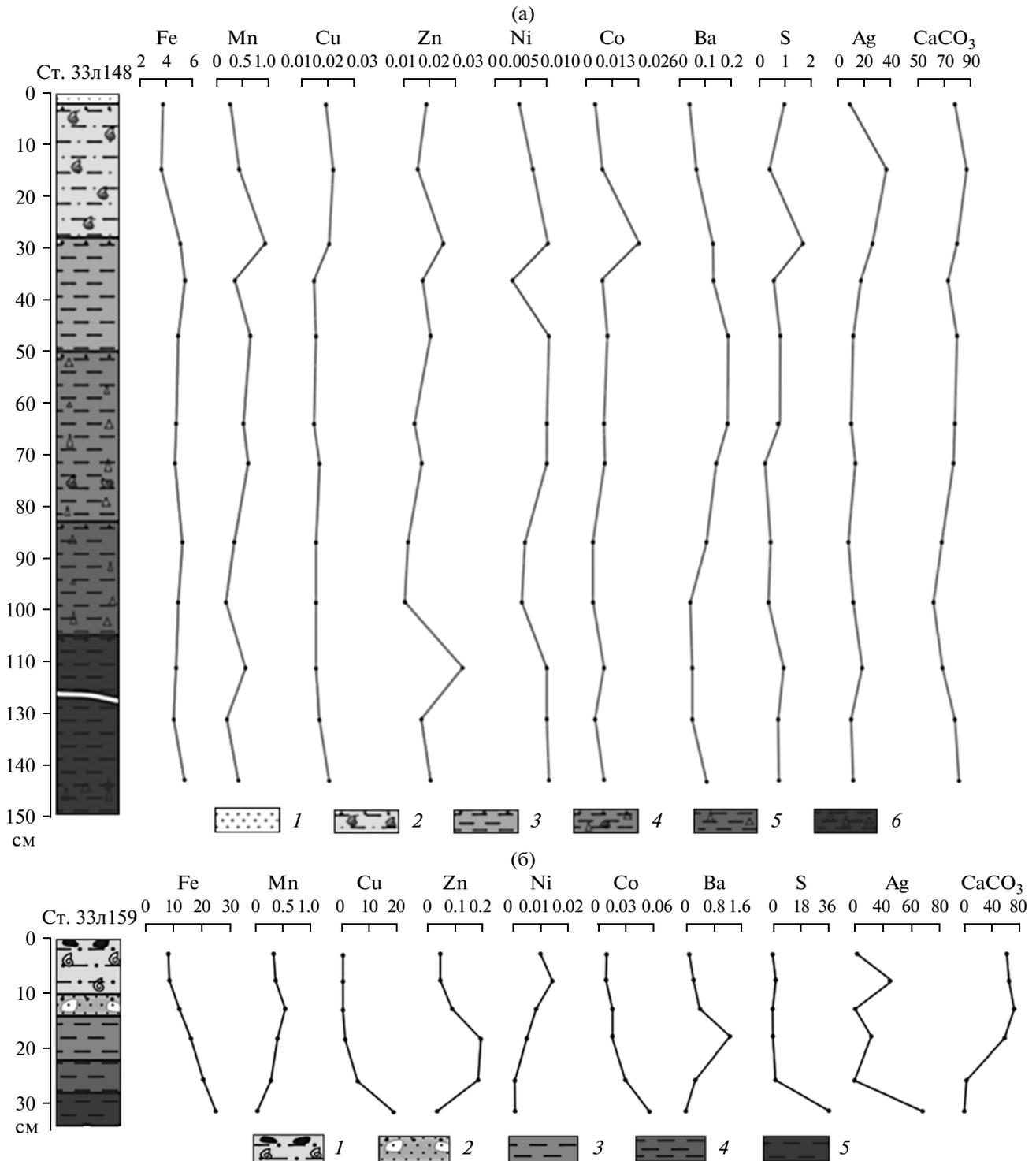


Рис. 3.

В разрезе сверху вниз заметно усиливается влияние гидротермальной деятельности на количественный состав кокколитов.

Поверхностный горизонт представляет собой карбонатный ил светло-бежевого цвета, содержащий многочисленные наннофоссилии и спикулы

губок. В нем определена полная ассоциация кокколитов (22 вида), аналогичная поверхностной пробе колонки 33л148 (рис. 46). Только здесь присутствуют виды *Braarudosphaera bigelowi* и *Syracolithus schilleri*. Второй из них является легко растворимым голококколитом вида *Calcidiscus lept-*

Таблица 2. Изменение среднегодовой поверхностной температуры в течение последних 125 тыс. лет по планктонным фораминиферам колонок станций 33л148 и 33л159

Ст. 33л148					
№	Горизонт, см	Температура, °С	Возраст	Экз/г сух. осадка	Птероподы
1	2–6	23	Голоцен	25600	Есть
2	11–15	24	Голоцен	51200	Много
3	20–24	21	Поздний плейстоцен (~20 тыс. лет)	7300	Есть
4	28–32	23	Поздний плейстоцен	8500	Обломки
5	38–42	22.5	»	22750	Обломки
6	47–50	23	»	11400	Обломки
7	70–73	22.5	»	15500	Единичные
8	97–99	22.5–23	»	15500	Нет
9	111–114	24	Поздний плейстоцен, возможно, конец последнего межледниковья (~100 тыс. лет)	7500	Нет
10	127–130	24.5	~120–125 тыс. лет (последнее межледниковье)	204800	Нет
11	148–150	24.5	»	8000	Нет

Ст. 33л159					
Горизонт, см	Температура, °С	Экз/г сух. осадка	Возраст	Примечание	
2–5	25	12500	Голоцен	Обломки птеропод	
5–10	24.5	7900	Голоцен	Много обломков птеропод	
10–14	26.5	12000	Голоцен	Обломки птеропод	
16–19	26	18200	Голоцен	То же	
19–22	25	3500	Конец позднего плейстоцена	G. menardii flexuosa, G. cf. hexagona	
22–24	25.5	3500	Конец позднего плейстоцена	G. hexagona	
24–26				Фракция желтая, единичные ПФ	
26–28				Фракция темно-коричневая, черные шарики, единичные ПФ	
28–34				Фракция та же +зерна с металлическим блеском	

porus и сохраняется исключительно в самых молодых, современных отложениях.

На глубине 5 см в осадке появляются минеральные новообразования, увеличивается содержание глинистых примесей. Кокколиты по-прежнему образуют большие скопления, видовое разнообразие снижается незначительно (с 22 до 20), но появляется много боя.

В горизонте 10 см присутствует опал. Цвет осадка постепенно меняется и приобретает более насыщенный красноватый оттенок. Здесь происходит резкое сокращение общих количеств кокколитов от больших до малых. Разнообразие комплекса снижается до 18 видов за счет выпадения *Ceratolithus cristatus* и *Pontosphaera syracusana*.

Еще более заметные изменения происходят на глубине 20 см, где развиты металлоносные осадки

бурого цвета. На этом уровне происходит резкое увеличение содержаний Zn (до 0.2%), Co — до 0.015% (рис. 3). Карбонатность остается на высоком уровне — почти 60%. Кокколиты становятся редкими, однако их разнообразие все еще составляет 15 видов. Здесь исчезают тепловодные *Pontosphaera multipora*, *Discosphaera tubifera* и *Hayaster perplexus*.

На глубине 25 см осадок меняется, он становится рудоносным бескарбонатным (содержание CaCO₃ падает до 6–7%) темно-бурого цвета, что означает почти полное изменение его под влиянием гидротермальных растворов. Содержание Fe увеличивается до 20%, Cu — до 6%, Co — до 0.03%, S — до 0.9%. Происходит кардинальное истощение ассоциации наннофоссилий, которые встречаются единично, а число видов падает до 4-х.

Таблица 3. Придонные условия по бентосным фораминиферам

Ст. 33л148		
Слой, см	Доминирующие БФ Численность раковин	Водная придонная обстановка
2–42 Ил карбонатный, бежевый	<i>S. angulata</i> , <i>Q. venusta</i> , <i>F. wuellerstorfi</i> , <i>P. bulloides</i> Низкая – менее 4 экз./г ($<0.001\%$ от общего количества фораминифер)	Североатлантические воды с нормальной соленостью, хорошо аэрированные. Интенсивное разбавление карбонатным материалом, поступающим из поверхностных вод. Скорость осадконакопления ~ 2–3 см/т.л.
47–99 Тот же ил с включениями эдафогенного материала	<i>Q. auberiana</i> , <i>Q. weaweri</i> , <i>P. lucernula</i> , <i>P. murrhina</i> , <i>F. wuellerstorfi</i> , <i>O. umbonatus</i> , <i>G. subglobosa</i> >15, до 46 экз./г (0.01–0.01 % от общ. числ. фор-р)	Североатлантические воды с нормальной соленостью, хорошо аэрированные. Скорость осадконакопления низкая – ~1 см/т.л.
104–150 Тот же ил, переслаивающийся со св-коричн. Встреч. включ. эдафогенного м-ла	<i>Q. auberiana</i> , <i>Q. weaweri</i> , <i>P. murrhina</i> , <i>F. wuellerstorfi</i> , <i>O. umbonatus</i> , <i>G. subglobosa</i> , <i>O. culter</i> 10–23 экз./г (0.1–0.2 % от общего числа раковин).	Североатлантические воды с нормальной соленостью, в небольшой степени агрессивные к карбонату кальция.
Ст. 33л159		
Слой, см	Доминирующие виды БФ %	Водная придонная обстановка
2–14 Ил карбонатный, фораминиферовый, плотный, с микро-включениями черного цвета	<i>E. exigua</i> (24–45%), <i>Q. venusta</i> (9–24%), <i>F. wuellerstorfi</i> (3–12%). Встречаются ожелезненные экз., на некоторых черные точки. 26–43 экз./г (0.1–1% от общ. числ. фор-р)	Североатлантические воды с нормальной морской соленостью, температурой, но с пониженным содержанием растворенного кислорода.
14–22 Металлоносный ил карбонатный, глубже 16 см приобретает коричневый оттенок	<i>G. subglobosa</i> (16–48%), <i>C. crassa</i> (4–18%). В гор. 19–22 см – <i>N. bradyi</i> (5%). Многие ожелезнены, на некоторых черные точки. 9–86 экз./г (1–2% от общ. числ. фор-р).	Воды обеднены кислородом, содержание карбонатных ионов миним., агрессивны к карбонатному м-лу (особ. гор. 19–22 см). Близость к гидротермам.
22–28 Рудоносный бескарбонатный осадок бурого цвета	Редкие раковины со следами растворения, многие ожелезнены. <1 экз./г	Воды значительно обеднены кислородом, содержание карбонатных ионов минимальное.
28–34 Рудоносный бескарбонатный черного цвета	Фораминиферы отсутствуют	

Примечание. Жирным отмечены виды, устойчивые к агрессивным водным условиям.

Наиболее устойчивыми оказываются *Gephyrocapsa oceanica*, *G. caribbeanaica*, *Helicosphaera carteri*, *Rhabdosphaera clavigera* и мелкие не определенные до вида экземпляры.

При дальнейшем снижении карбонатности и увеличении перечисленных показателей содержания микроэлементов наннофоссилии исчезают тотально. Это происходит на 2 см ниже по разрезу, в горизонте 27 см, где осадок полностью изменен. Здесь отмечены максимальные значения Fe, Cu, Co, S и минимальные – CaCO₃, Mn и Ba (рис. 2). Следует отметить, что облик кокколитов

при этом не меняется, они просто целиком растворяются.

По кокколитам осадки принадлежат к верхней биостратиграфической зоне *Emiliana huxleyi*, образование которой в голоцене происходило в тропических условиях, что подтверждается результатами палеотемпературного анализа комплексов планктонных фораминифер.

Изменение видового состава и численности наннофоссилий свидетельствует о минимальном влиянии рудопроявления на осадки в районе колонки 33л148 и об ослаблении этого влияния

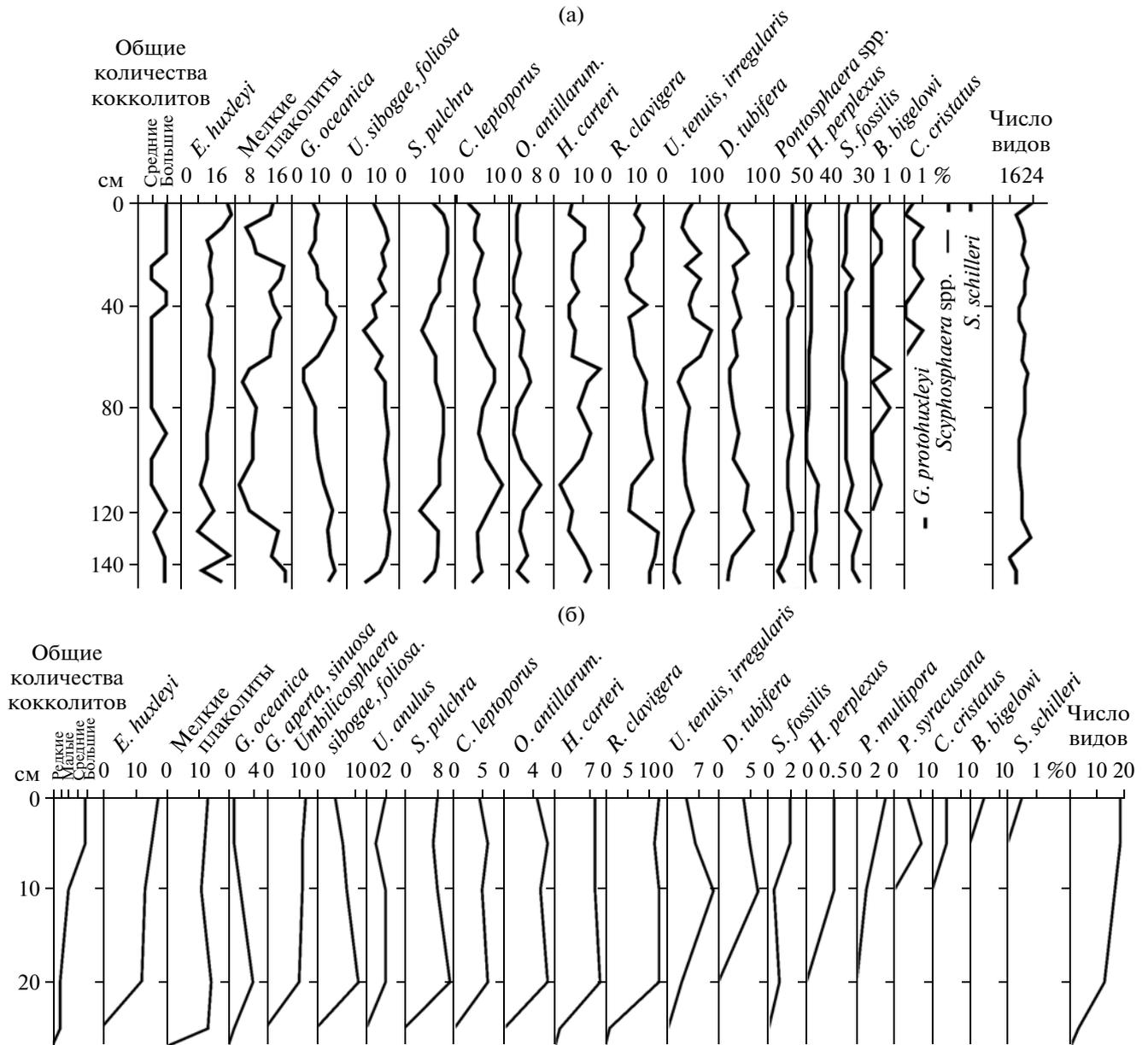


Рис. 4. Распределение наннофоссилий в разрезах колонок 33л148 (а) и 33л159 (б).

вплоть до полного прекращения к настоящему времени в районе расположения колонки 33л159.

ОБСУЖДЕНИЕ

Проведенные исследования показали, что, как и на поле Ашадзе-1 [4], в зоне гидротермальных проявлений поля Петербургского биогенный материал карбонатных донных осадков голоцен—позднеплейстоценового возраста испытал интенсивные преобразования, которые выражаются в растворении кальцитовых раковин микроорганизмов и замещении их вторичными минерала-

ми. Наиболее подвержены растворению кокколлиты и птероподы.

Птероподы, обладающие менее устойчивой к растворению арагонитовой раковиной, чем кальцитовые раковины фораминифер, присутствуют в верхней части обеих колонок (табл. 2), что свидетельствует о благоприятной для их сохранения донной обстановке и отсутствии условий для растворения [7]. В нижней части колонки 33л159 (ниже 19 см) они исчезают, что, вероятно, связано с усилением влияния кислых гидротермальных растворов. В меньшей степени влияние кислых флюидов, приводящее к растворению птеропод,

проявилось в колонке 33л148, где их остатки сохраняются до горизонта 70–73 см (табл. 2).

В зоне гидротермальной деятельности (ст. 33л159, поле Петербургское) происходит постепенное снижение численности и видового разнообразия кокколитов вниз по разрезу и их полное исчезновение на глубине 27 см. Обвальное падение видового разнообразия отмечается при переходе от горизонта 20 см к горизонту 25 см, где исчезает большинство видов и остаются только редкие экземпляры 4-х наиболее устойчивых видов – *Gephyrocapsa oceanica*, *Helicosphaera carteri*, *Rhabdosphaera clavigera*, *Scapholithus fossilis* (рис. 4). Аналогичная картина наблюдается и в отношении планктонных и бентосных фораминифер. Изменение видового состава и численности бентосных фораминифер свидетельствуют о том, что ниже уровня 19 см придонная обстановка была резко агрессивной. Начиная с глубины 24–27 см, встречаются лишь единичные определяемые экземпляры фораминифер, остальные полностью замещены гидротермальными минералами (рис. 2). Поскольку колонка расположена значительно выше критической глубины карбонатонакопления, составляющей в данном районе ~5500 м [7], такие изменения, скорее всего, объясняются влиянием гидротермальных растворов, которое сильнее проявлялось в более низких, плейстоценовых горизонтах, чем в голоценовых. Это отражается также на резком снижении карбонатности осадков вниз по разрезу и росте содержания Fe, Cu, Co, S (рис. 3). Изменение видового состава и численности наннофоссилий свидетельствует о минимальном влиянии гидротермальных растворов на осадки в районе колонки 33л148 и об ослаблении этого влияния на осадки вверх по разрезу колонки 33л159. Последнее может быть связано как с длительностью воздействия гидротермальных растворов на осадки, снижающегося вверх по разрезу, так и с постепенным отдалением района колонки 33л159 от оси спрединга, которое составляет за время образования зоны от 6000 до >8000 м.

Примечательно, что на уровне резкого снижения численности карбонатных фоссилий (ниже 27 см), отмечено появление сульфидов и уменьшение количества гетита, и это свидетельствует о смене вниз по разрезу окислительных условий восстановительными. Влияние флюидов, обогащенных Fe, Mn и другими рудообразующими элементами, прослеживается и в верхних частях колонки, находящейся в зоне влияния морской воды с окислительной средой, и выражается в развитии гидроксидно-железистых и марганцовистых корочек на раковинах микрофоссилий. Данные, полученные по колонке 33л159 (поле Петербургское), свидетельствуют о существенном влиянии диффузных гидротермальных флюидов на биогенные карбонатные осадки в зонах гидротермальной разгрузки и согласуются со сде-

ланными ранее выводами о широком распространении этого явления в океане [4, 5].

Интересные результаты получены по колонке 33л148, находящейся на расстоянии около 5 км от рудного поля. Здесь раковины микрофоссилий имеют хорошую сохранность по всему разрезу, но отмечены некоторые изменения. Так, ниже 50 см происходит уменьшение общей численности наннофоссилий, а ниже 130 см – сокращение их видового состава. На поверхности некоторых раковин присутствуют кристаллы вторичных минералов. Ниже 73 см исчезают остатки птеропод.

Резкие количественные изменения бентосных фораминифер в осадках верхней и нижней частей колонки 33л148 свидетельствуют не об изменениях продуктивности океана, а скорее связаны с изменением гидрохимической обстановки на дне. По данным анализа планктонных фораминифер верхний горизонт этой колонки (0–20 см) соответствует голоцену. В это время на океанском дне существовали благоприятные условия для сохранности карбонатных остатков фораминифер, кокколитов, птеропод и остракод. На дне накапливалось огромное количество взрослых и ювенильных форм планктонных фораминифер, значительно превосходящих число бентосных раковин. Скорость осадконакопления составляла несколько см в тысячу лет. Число бентосных экземпляров, также многочисленных, оказалось таким низким из-за сильного разбавления их поступающими из поверхностных вод карбонатными остатками планктонных фораминифер и птеропод.

В течение позднего плейстоцена, во время формирования слоя 40–150 см на дне также накапливались фораминиферо-коколитовые осадки, но с меньшей скоростью (менее 1 см в тыс. лет), так как условия для сохранения карбонатных раковин были менее благоприятны. Как и в голоцене, фораминиферы представлены в основном планктонными формами, но их относительное содержание немного уменьшилось, что, возможно, связано с изменением гидрохимических условий на дне океана. Раковины планктонных фораминифер, которые приносятся из поверхностных слоев водной толщи, растворяются гораздо интенсивнее, чем бентосные формы. Последние не только более устойчивы к растворению, но в некоторых случаях отдельные виды могут строить карбонатные раковины даже в водах, недонасыщенных карбонатом кальция [12]. При этом число бентосных фораминифер становится более заметным. На всем протяжении формирования разреза 33л148 численность и видовой состав бентосных фораминифер свидетельствует о том, что придонные воды были хорошо аэрированы, но в горизонте 100–150 см несколько усилилась их агрессивность к карбонатному материалу. Причиной, по которой в позднем плейстоцене воды были ме-

нее насыщены кислородом и в некоторой степени агрессивны к карбонатному материалу, могло быть как изменение состава придонных вод в ледниковый период, так и активизация гидротермальной деятельности. Возможно, действовали оба фактора. Об усилении агрессивности вод к карбонату кальция свидетельствует также присутствие в небольшом количестве *Osangularia culter* в нижней части колонки [8].

Таким образом, в основании фоновых осадков, вскрытых колонкой 33л148, возможно, проявлены первые признаки поступления кислых агрессивных растворов, влияющих на условия обитания бентоса и захоронения раковин планктона. Эти данные могут быть использованы в качестве поискового критерия, так как указывают на вероятность нахождения поблизости активных гидротермальных источников.

ВЫВОДЫ

1. По планктонным фораминиферам выделяются осадки голоцена и плейстоцена, их граница в обеих колонках располагается на уровне 20 см. Определены температуры поверхностных вод, которые фиксируют смену субтропических условий в позднем плейстоцене на тропические в голоцене. По кокколитах осадки принадлежат верхней биостратиграфической зоне *Emiliania huxleyi*.

2. В результате проведенных минералого-геохимических исследований выявлены существенные изменения минерального и химического состава осадков в зоне активной гидротермальной деятельности (поле Петербургское, ст. 33л159) по сравнению с фоновыми (ст. 33л148). Влияние гидротермальных флюидов на биогенные карбонатные осадки в зоне гидротермальной активности выражено в усиливающемся вниз по разрезу растворении раковин микрофоссилий и метасоматическом замещении их гидротермальными минералами. Характер изменений и их вертикальная зональность свидетельствуют о воздействии на осадки кислых диффузных растворов, поступавших снизу. Видовой состав и численность наннофоссилий и бентосных фораминифер свидетельствует о том, что в колонке 33л159 снизу вверх по разрезу происходило снижение влияния гидротерм.

3. В фоновых осадках, изученных по колонке ст. 33л148 (в 5 км от рудного поля), остатки микрофоссилий имеют хорошую сохранность по всему разрезу. В основании колонки отмечено слабое воздействие кислой агрессивной среды, выраженное в исчезновении остатков птеропод, изменении численности и видового состава бентосных фораминифер, уменьшении общей численности и видового состава наннофоссилий, появлении минеральных новообразований на раковинах. Эти данные могут быть использованы в качестве по-

искового критерия, так как указывают на возможность нахождения поблизости активных гидротермальных источников.

Авторы благодарят С.Г. Кобыленского и В.А. Карлова за помощь при фотографировании образцов, Е.В. Покровскую и М.А. Яговкину за проведение анализов.

Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ (гранты № 08-05-00799 и № 11-05-01117).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Бараш М.С., Блюм Н.С.* Современные танатоценозы планктонных фораминифер Северной и Экваториальной Атлантики // *Океанология*. 1975. Т. 15. № 1. С. 108–115.
2. *Бараш М.С., Купцов В.М., Оськина Н.Н.* Атлантический океан: новые данные по хронологии событий позднего плейстоцена и голоцена // *Бюллетень комиссии по изучению четвертичного периода*. 1987. Т. 27. Вып. 3. С. 423–436.
3. *Бурмистрова И.И.* Современные глубоководные сообщества бентосных фораминифер Атлантического и Индийского океанов // *Неоген-четвертичная палеоокеанология*. М.: Наука, 1989. С. 38–42.
4. *Габлина И.Ф., Демина Л.Л., Дмитренко О.Б. и др.* Состав, распространение и особенности вторичных изменений микрофоссилий донных осадков современного гидротермального поля Ашадзе-1 (13° с.ш. САХ) // *Океанология*. 2011. Т. 51. № 3. С. 505–520.
5. *Габлина И.Ф., Добрецова И.Г., Бельтнев В.Е. и др.* Особенности современного сульфидного оруденения в районе 19°15'–20°08' с. ш. Срединно-Атлантического хребта // *Докл. РАН*. 2012. Т. 442. № 4. С. 506–510.
6. *Дубравин В.Ф.* Поверхностные водные массы Атлантического океана. СПб.: Гидрометеиздат, 2001. 116 с.
7. *Лисицын А.П.* Процессы океанской седиментации. М.: Наука, 1978. 392 с.
8. *Лукашина Н.П.* Палеоокеанология Северной Атлантики в позднем мезозое и кайнозое и возникновение современной термогалинной океанской циркуляции по данным изучения фораминифер. М.: Научный мир, 2008. 288 с.
9. *Нешиба С.* *Океанология*. М.: Мир, 1991. 413 с.
10. *Степанов В.Н.* *Океаносфера*. М.: Мысль, 1983. 270 с.
11. *Шилов В.В., Бельтнев В.Е., Иванов В.И. и др.* Новые гидротермальные рудные поля на Срединно-Атлантическом хребте: “Зенит-Виктория” (20°08' с.ш.) и “19°52' с.ш.” // *Докл. РАН*. Т. 442. № 3. С. 383–389.
12. *Berger W.H.* Planktonic Foraminifera: Selective Solution and paleoclimatic Interpretation // *Initial Reports of the Deep-Sea Drilling Project*. 1968. V. 15. P. 31–43.
13. *Bremer M.L., Louman G.P.* Evidence for primary control of the distribution of central Atlantic ocean benthonic foraminifera by degree of carbonate saturation // *Deep-Sea Res.* 1982. V. 29. P. 987–998.
14. *Bukry D.* Biostratigraphy of Cenozoic sediments by calcareous nannofossils // *Micropaleontology*. 1978. V. 24. № 1. P. 44–60.

15. *Corliss B.H.* Recent benthonic Foraminifera distribution in the southeast Indian Ocean: Inferred bottom water routes and ecological implication // *Mar. Geol.* 1979. V. 31. P. 115–138.
16. *Corliss B.H.* Microhabitats of benthic foraminifera within deep-sea sediments // *Nature*. 1983. V. 324. P. 435–438.
17. *Gartner S.* Calcareous nannofossil stratigraphy and revised zonation of the Pleistocene // *Marine Micropaleont.* 1977. V. 2. P. 1–25.
18. *Martini E., Worsley T.* Standard Neogene calcareous nannoplankton zonation // *Nature*. 1970. V. 225. № 5229. P. 289–290.

Influence of Hydrothermal Activity on Calcareous (Carbonate) Microfossils in the Bottom Sediments of the Tropical Atlantic Region

I. F. Gablina, O. B. Dmitrenko, N. S. Os'kina, T. A. Khusid, E. A. Popova

The chemical and mineral composition, complexes of planktonic, benthic foraminifers and nannoplankton have been studied in the two columns of bottom sediments raised in the area of the Petersburg hydrothermal ore field (northern Atlantic region) and beyond. Holocene and late Pleistocene sediments were identified; their boundary in both columns is located at a level of 20 cm. The temperature of surface waters was determined, which marks the change of the tropical conditions in the Holocene to subtropical in the Upper Pleistocene. It was found out that hydrothermal fluids have a significant effect on biogenic carbonate sediments in the ore-forming zone of the Petersburg field (st. 33 1 159), expressed in the dissolution of microfossil tests and their replacement by hydrothermal minerals. The manner of their change and their vertical arrangement indicate that acidic diffuse solutions arrive into the sediments from below. In the background sediments, studied in column st. 33 1 148 (5 km away from the ore field), the tests of microfossils are well preserved along the entire section. The base of the column shows a low impact of acidic corrosive environment, expressed in disappearance of pteropod remains, change in the number and species composition of benthic foraminifers, decrease in the total number and species composition of nannofossils. These data can be used as a search criterion, as they provide possibility of finding hydrothermal sources nearby.