

УДК 551.46 (551.352)

ЧЕТВЕРТИЧНЫЕ КРЕМНЕВЫЕ МИКРОФОССИЛИИ ЭКВАТОРИАЛЬНОЙ АТЛАНТИКИ И ИХ РОЛЬ В ПАЛЕООКЕАНОЛОГИЧЕСКИХ РЕКОНСТРУКЦИЯХ

Л.А. Кулешова¹, А.Г. Матуль², Г.Х. Казарина³, Л.Д. Баширова⁴

^{1–4} *Институт океанологии имени П.П. Ширшова РАН*

⁴ *Балтийский федеральный университет имени И. Канта,
директор НОЦ «Геоэкология и морское природопользование»*

¹ *Лаборатория геологии Атлантики, науч. сотр.; e-mail: lubov_kuleshova@mail.ru*

² *Зав. лабораторией палеоэкологии и биостратиграфии, гл. науч. сотр., д-р геол.-минерал. наук; e-mail: amatul@mail.ru*

³ *Лаборатория палеоэкологии и биостратиграфии, вед. науч. сотр., канд. геогр. наук; e-mail: gkazarina@mail.ru*

⁴ *Зам. директора по научной работе, зав. лабораторией геологии Атлантики,
канд. геол.-минерал. наук; e-mail: bas_leila@mail.ru*

В данной работе проанализированы количественное распределение и таксономический состав кремневых микрофоссилий – диатомей и радиолярий – в глубоководной колонке АНС-33047 (08°16,380' с. ш., 31°42,870' з. д., глубина океана 4027 м, длина разреза 516 см), отобранной в южной части котловины Зеленого Мыса в восточной экваториальной области Атлантического океана. В сообществе радиолярий выделены две экологические группы видов: тропико-экваториальная и североатлантическая умеренного пояса. Комплекс ископаемых диатомовых водорослей представлен преимущественно тропико-экваториальными видами, а также пресноводными диатомеями, которые могут служить индикаторами эолового переноса взвеси из Африки. По вариациям численности диатомей и радиолярий установлено, что накопление кремнезема в экваториальной зоне в четвертичном периоде было пульсирующим: интервалы сравнительно интенсивного накопления кремнезема сменялись периодами резкого ослабления. Доминирующими в накоплении кремнезема в течение кратковременных интервалов морских изотопных стадий (МИС) 13–8 были как диатомеи, так и радиолярии – их повышенные концентрации в осадках возрастом около 513, 430, 300 и 250 тыс. лет, вероятно, отражают проникновение в район исследования высокопродуктивных вод экваториальной дивергенции. В пределах МИС 7–1 общая низкая численность диатомей на фоне преобладания радиолярий в отдельных интервалах позволяет предполагать существование менее продуктивных условий в поверхностном слое и попеременном влиянии глубоководного палеоапвеллинга, прежде всего на подповерхностную среду. Зарегистрированный в МИС 12 пик численности пресноводных диатомей, по-видимому, связан с поступлением эолового материала с африканского континента в результате усиления тропического восточного ветра и активизации процессов дефляции.

Ключевые слова: четвертичный период, диатомовые водоросли, радиолярии, осадконакопление, экваториальный кремневый пояс, котловина Зеленого Мыса

DOI: 10.55959/MSU0579-9414.5.78.5.4

ВВЕДЕНИЕ

Реконструкция палеоокеанологических условий по глубоководным колонкам сопряжена с определенными ограничениями, такими как сильное растворение карбонатных микрофоссилий, низкие скорости осадконакопления. В связи с чем возрастает необходимость в применении дополнительных независимых палеоиндикаторов, среди которых кремневые составляющие осадка обладают высоким потенциалом использования. Диатомовые водоросли и радиолярии являются одними из наиболее разнообразных групп микрофито- и микрзоопланктона соответственно. Для построения своих скелетов они извлекают из воды кремний. Благодаря этой

способности данные организмы играют огромную роль в круговороте кремния в Мировом океане и эволюции биогенного кремненакопления [Lisitzin, 1985].

Более 75% всего океанского кремнезема накапливается в Южном океане, что обусловлено положением области антарктической конвергенции [Кеннет, 1987]. В результате ветровой активности в данном регионе происходит сгон поверхностных вод на север, которые затем замещаются промежуточными водами, богатыми питательными веществами [Кеннет, 1987; Афанасьева и др., 2005]. Как следствие, увеличивается биологическая продуктивность акватории и наблюдается усиленное

накопление кремневых микрофоссилий в донных осадках, главным образом диатомовых илов [Lisitzin, 1985; Кеннет, 1987; Takahashi, 1991; Афанасьева и др., 2005; Свальнов, Казарина, 2008].

Повышенная плотность популяций диатомей и радиолярий свойственна также экваториальным районам и контролируется положением зон дивергенции и интенсивных прибрежных апвеллингов [Кеннет, 1987; Abelmann, Gowing, 1997; Lange et al., 1994; Treppke et al., 1996; Romero et al., 1999; Афанасьева и др., 2005]. Асимметричное распределение ветров над поверхностью океана способствует обширному подъему глубинных вод и привнесу биогенных элементов в фотический слой, что благоприятно сказывается на развитии продукции фито- и зоопланктона [Lange et al., 1994; Romero et al., 1999; Афанасьева и др., 2005]. Так называемый «экваториальный пояс биогенных кремневых илов» хорошо выражен в Индийском и Тихом океанах, но слабо проявляется в современных осадках Атлантического океана [Lisitzin, 1985; Hein, Parrish, 1987; Свальнов, Казарина, 2008]. Среди кремнеосодержащих микрофоссилий в экваториальной области преобладают скелеты радиолярий, в меньшей степени встречаются створки диатомей и силикофлагелляты [Lisitzin, 1985; Кеннет, 1987; Takahashi, 1991; Свальнов, Казарина, 2008].

Исследования динамики численности современных кремневых микрофоссилий в экваториально-тропической Атлантике показали, что распределение диатомей и радиолярий имеет сезонную изменчивость [Lange et al., 1994; Treppke et al., 1996; Romero et al., 1999, 2000]. Это связано с региональными миграциями области минимума атмосферного давления и, соответственно, силой преобладающих ветров (пассатов), определяющих положение фронтальных зон в верхнем слое океана и районов повышенной первичной биопродуктивности. Современная зона экваториальной дивергенции в Атлантике ограничена по акватории, поэтому апвеллинг биогенных элементов для кремневых микроорганизмов отражается в аккумуляции повышенных масс биогенного кремнезема (>5 весовых %) в узком субширотном районе, примыкающем к Африке [Sarmiento, Gruber, 2006]. Считается, что пояс биогенного кремнеосаждения испытывал значительные ледниково-межледниковые флуктуации в четвертичном периоде [Lisitzin, 1985; Pokras, 1987]. Так, в пределах ледниковых интервалов пояс мог расширяться и/или смещаться к северу от своего современного положения с одновременным увеличением содержания диатомей в составе кремневых сообществ организмов.

Настоящая работа посвящена изучению количественного распределения и таксономического со-

става сообществ диатомей и радиолярий в колонке АНС-33047, отобранной в южной части котловины Зеленого Мыса к востоку от Срединно-Атлантического хребта на глубине более 4 км. Осадки исследуемой колонки имеют средне-позднечетвертичный возраст [Kuleshova et al., 2022]. Особенностью данного района является его близкое расположение к северной границе экваториального кремневого пояса, являющегося зоной повышенного накопления диатомово-радиоляриевых илов [Nigrini, 1967; Goll, Bjørklund, 1971; Матуль, 1989; Schrader et al., 1993; Sarmiento, Gruber, 2006; Boltovskoy, Correa, 2017]. Это позволяет предполагать, что даже небольшие миграции и/или изменения протяженности пояса в прошлом могли существенно повлиять на местное биогенное кремнеосаждение. Высокая чувствительность радиолярий и диатомей к изменениям окружающей среды, а также хорошая сохранность их скелетов в донных осадках дают возможность использовать данные анализа кремнеосодержащих микрофоссилий для палеоокеанологических исследований в глубоководных районах [Pokras, 1987; Свальнов, Казарина, 2008; Matul, Mohan, 2017]. Присутствие в таких областях агрессивных недонасыщенных карбонат-ионом придонных вод ниже лизоклина и критической глубины карбонатакопления (в Атлантическом океане >4–4,5 км) приводит к потере палеонтологической информации, прежде всего вследствие интенсивного растворения карбонатных составляющих осадка [Berger, 1968]. В то же время кремневые компоненты оказываются более устойчивыми к растворению в абиссальных зонах [Lisitzin, 1985; Кеннет, 1987; Takahashi, 1991]. Кроме того, в открытом океане на больших глубинах скорости осадконакопления, как правило, весьма низкие, что значительно осложняет выполнение реконструкций в колонках донных осадков. Вышеуказанные лимитирующие факторы служат одним из объяснений относительно слабой изученности подобных районов с точки зрения четвертичной палеоокеанологии и обуславливают необходимость применения комплексного подхода в исследовании донных осадков с использованием дополнительных независимых индикаторов.

Район исследования. Экваториальная область Атлантического океана характеризуется сложной системой поверхностных и подповерхностных течений (рис. 1). Одни течения направлены на запад, другие (противотечения) – на восток. Большую часть года на данный регион оказывает влияние внутритропическая зона конвергенции (ВЗК) – область сходящихся пассатов и восходящего воздуха, для которой свойственно обильное выпадение осадков [Schneider et al., 2014; Portilho-Ramos et al., 2017]. Последнее приводит к понижению солёности по-

верхностных вод и усилению вертикальной стратификации. Для ВЗК характерно сезонное смещение от 6° с. ш. в феврале до 15° с. ш. в августе (относительно побережья Африки), связанное с региональными перестройками атмосферной и поверхностной океанской циркуляции вследствие изменения меридионального градиента поверхностных температур [Peterson, Stramma, 1991; Stramma, Schott, 1999; Stramma et al., 2005]. Бореальным летом среди воздушных потоков усиливается составляющая юго-восточных пассатов. Как следствие, в поверхностном слое океана активизируется южная ветвь Южного экваториального течения (юЮЭТ), переносящая теплые воды из Южной Атлантики через экватор в Северное полушарие [Vilela et al., 2018]. Так, соединяясь с Северным Бразильским подповерхностным течением (СБП) около 5° ю. ш. (близ мыса Сан-Роке, Бразилия), юЮЭТ преобразуется в поверхностное Северное Бразильское течение (СБТ). Двигаясь вдоль северного побережья Брази-

лии со скоростью около 1 м/с, это течение участвует в поставке биогенных элементов из устья реки Амазонки в поверхностный слой экваториальной Атлантики [Bourlès et al., 1999; Vilela et al., 2018]. Под действием юго-восточных пассатов и экмановского переноса, СБТ расширяется и отклоняется на восток между 5° с. ш. и 10° с. ш. [Bourlès et al., 1999], тем самым «подпитывая» и усиливая Северное экваториальное поверхностное противотечение (СЭП) [Peterson, Stramma, 1991]. Данный процесс сопровождается миграцией ВЗК на север [Stramma, Schott, 1999]. При этом возрастает температурный градиент поверхностного слоя океана между теплыми водами ВЗК и относительно холодными водами близ географического экватора, что приводит к интенсификации сезонных ветров и возникновению фронтальной зоны экваториальной дивергенции на широте между СЭП и ЮЭТ (~0–2° с. ш. в среднем) [Peterson, Stramma, 1991; Hormann et al., 2013; Tubul et al., 2015].

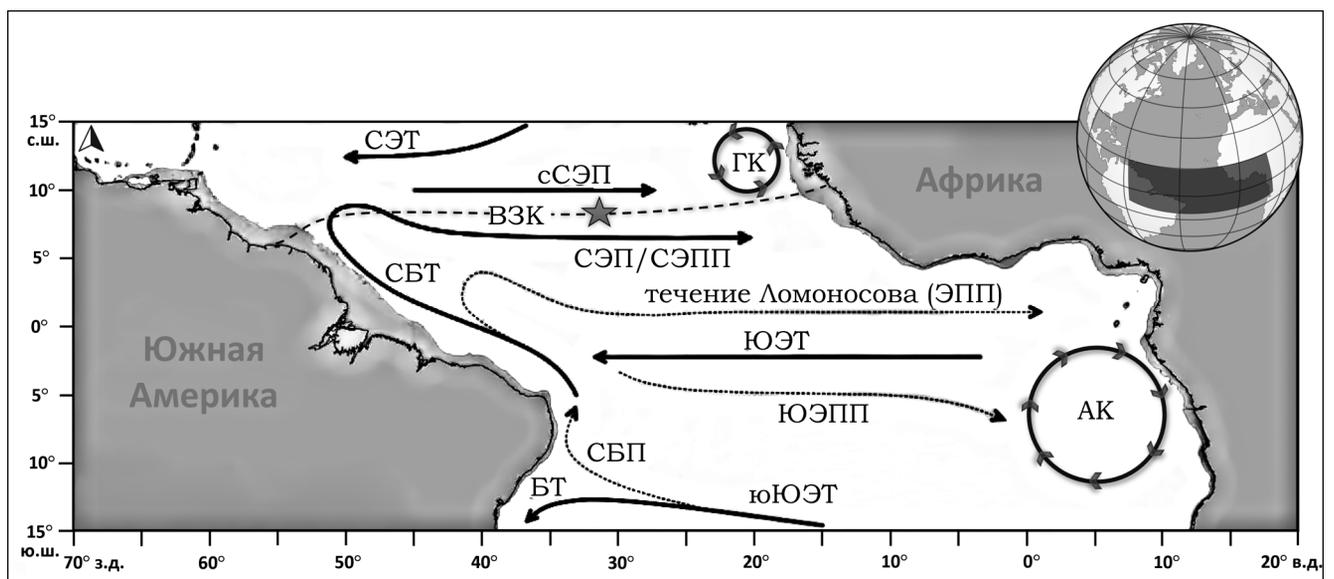


Рис. 1. Карта района исследования и общая схема поверхностной циркуляции в экваториальной области Атлантического океана [Peterson, Stramma, 1991; Vilela et al., 2018]:

СЭТ – Северное экваториальное (пассатное) течение; СЭП – Северное экваториальное (межпассатное) поверхностное противотечение; сСЭП – северная ветвь Северного экваториального поверхностного противотечения; СЭПП – Северное экваториальное подповерхностное противотечение; ЭПП – Экваториальное подповерхностное противотечение (или течение Ломоносова); ЮЭПП – Южное экваториальное подповерхностное противотечение; ЮЭТ – Южное экваториальное (пассатное) течение; юЮЭТ – южная ветвь Южного экваториального течения; БТ – Бразильское течение; СБП – Северное Бразильское подповерхностное течение; СБТ – Северное Бразильское течение; ГК – Гвинейский купол; АК – Ангольский купол. Пунктирной линией показано среднегодовое положение внутритропической зоны конвергенции (ВЗК) [Portilho-Ramos et al., 2017]. Звездочкой обозначена исследуемая колонка АНС-33047

Fig. 1. Map of the study area and the general scheme of surface water circulation in the equatorial Atlantic [Peterson, Stramma, 1991; Vilela et al., 2018]:

СЭТ – North Equatorial Current; СЭП – North Equatorial Countercurrent; сСЭП – northern branch of the North Equatorial Countercurrent; СЭПП – North Equatorial Undercurrent; ЭПП – Equatorial Undercurrent (or Lomonosov Current); ЮЭПП – South Equatorial Undercurrent; ЮЭТ – South Equatorial Current; юЮЭТ – southern branch of the South Equatorial Current; БТ – Brazil Current; СБП – North Brazil Undercurrent; СБТ – North Brazil Current; ГК – Guinea Dome; АК – Angola Dome. The dashed line shows the mean annual position of the Intertropical Convergence Zone (ВЗК), according to Portilho-Ramos et al. [2017]. The star indicates the location of the studied ANS-33047 core

В вертикальном разрезе СЭП занимает глубины 0–100 м. На подповерхностных и промежуточных глубинах (100–500 м) проходят Северное экваториальное подповерхностное противотечение (СЭПП) и располагающиеся к югу от него Экваториальное подповерхностное противотечение (ЭПП, или течение Ломоносова), а также Южное экваториальное подповерхностное противотечение (ЮЭПП) [Stramma, Schott, 1999; Stramma et al., 2005]. СЭП и СЭПП, движущиеся с запада на восток на широте 8–10° с. ш., являются основными источниками кислорода для северо-восточной области экваториальной Атлантики. Северные потоки этих течений формируют структуру под названием Гвинейский купол (ГК) [Stramma et al., 2005]. Она представляет собой стационарный циклонический круговорот, где термоклин наиболее близко поднимается к поверхности. ГК прослеживается до глубины 350 м с центром в координатах около 10° с. ш. и 23° з. д. Диаметр ГК сезонно меняется в пределах сотен километров, наибольшие размеры купола приурочены к концу бореального лета, когда ВЗК смещается к северу и активность СЭП усиливается.

Зимой, когда преобладают северо-восточные пассаты, поток СБТ ослаблен и движется преимущественно на северо-запад вдоль побережья Южной Америки [Bourlès et al., 1999]. В результате снижаются темпы образования СЭП. В то же время под действием северо-восточных пассатов активизируются процессы формирования прибрежных апвеллингов у северо-западного побережья Африки [Schneider et al., 2014]. Как следствие, в поверхностном слое наблюдаются пониженные температуры и повышенные концентрации биогенных элементов, поступающие из подповерхностных и промежуточных вод. Одновременно происходит смещение ВЗК на юг, ближе к экватору [Vilela et al., 2018]. В декабре–феврале происходит интенсификация циркуляции Ангольского купола (АК), являющегося аналогом ГК в Южном полушарии. Центр АК располагается примерно на 10° ю. ш. и 9° в. д. [Stramma, Schott, 1999; Vilela et al., 2018].

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Материалом для исследования послужили образцы донных осадков колонки АНС-33047 (08°16,380' с. ш., 31°42,870' з. д., глубина океана 4027 м, длина колонки 516 см), которая была отобрана в южной части котловины Зеленого Мыса, к востоку от Срединно-Атлантического хребта, в 33-м рейсе научно-исследовательского судна «Академик Николай Страхов» в 2016 г. (см. рис. 1). Отбор колонки осуществлялся ударной грунтовой трубкой.

На борту судна осадочный разрез разделяли вдоль на две половины: рабочую и архивную. Да-

лее проводили визуальное литологическое описание осадков и отбор проб из рабочей половины непрерывно с шагом 1 см. Ранее для колонки АНС-33047 была получена возрастная модель [Kuleshova et al., 2022], которая основана на сопоставлении данных стабильных изотопов кислорода с глобальной кривой LR04 [Lisiecki, Raymo, 2005], а также на результатах измерения магнитной восприимчивости и содержания карбоната кальция в осадке. Возраст основания вскрытых отложений составил 513 тыс. лет [Kuleshova et al., 2022].

Встреченный в нижней части колонки (горизонт 515–516 см) вид радиолярий *Stylatractus universus* является биостратиграфическим маркером: уровень его последнего появления в тропических широтах имеет возраст 400–540 тыс. лет [Kamikuri et al., 2009]. Данный датировочный уровень не противоречит возрастной модели колонки АНС-33047, что повышает достоверность выполненного ранее стратиграфического расчленения осадочного разреза [Kuleshova et al., 2022].

Исследование диатомовых водорослей и радиолярий проводили в микропалеонтологических препаратах в колонке АНС-33047 с интервалом опробования 10–20 см. Лабораторная обработка образцов осадка соответствовала стандартной процедуре, описанной Цилинским с соавторами [Zielinski et al., 1998], Абельманн с соавторами [Abelmann et al., 1999], а также в [Диатомовые водоросли СССР..., 1974]. Затем под биологическими микроскопами проходящего света Carl Zeiss PrimoStar и AxioLab.A1 анализировали готовые препараты при 300–1000-кратном увеличении.

Всего было изучено 34 слайда. В каждом препарате подсчитано не менее 200–300 экземпляров диатомей и радиолярий для расчета процентного содержания видов, а также их суммарной численности в 1 г сухого осадка. Пробы с содержанием менее 200 экземпляров включали в анализ, но считали недостаточно надежными.

Определялся таксономический состав комплексов диатомей и радиолярий. Для оценки вариаций палеоокеанологических условий встреченные виды были разделены авторами на группы в соответствии с имеющимися в литературе данными об их экологических предпочтениях [Атлас микроорганизмов..., 1977; Матуль, 1989; Matul, Mohan, 2017]. При анализе диатомей дополнительная палеоклиматическая информация может быть получена из данных по пресноводным видам, которые попадают в местные осадки с эоловыми потоками взвеси из Африки [Pokras, Mix, 1985]. Среди как диатомей, так и радиолярий некоторую часть в комплексах должны составлять широко распространенные виды, в том числе космополиты, встречающиеся от субарктических до тропических

широт. Анализ радиолярий в колонке АНС-33047 показал существенную численность видов, составляющих сейчас основу субарктической и северо-умеренной групп в Северной Атлантике и обычно встречающихся в поверхностных осадках всей Северной Атлантики [Матуль, 1989; Matul, Mohan, 2017]. Эти виды мы объединили в североатлантическую группу, отражающую более холодноводные условия, проявляющиеся при активизации дивергенции (апвеллинга более холодной воды к поверхности).

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Микропалеонтологический анализ диатомей и радиолярий позволил установить спорадический

(нерегулярный) характер распределения кремневых микрофоссилий по разрезу колонки АНС-33047. В течение морских изотопно-кислородных стадий (МИС) 12–8 вариации численности диатомей и радиолярий имеют сходные тенденции: повышенные значения зафиксированы в пробах с возрастом около 513, 430, 300 и 250 тыс. лет. В осадках последних 246 тыс. лет диатомей практически отсутствуют, в то время как доля скелетов радиолярий в составе кремнистых отложений возрастает в пределах отдельных межледниковых интервалов МИС 7 и 5, а также в МИС 3 – Терминации I (около 50–16 тыс. лет назад). В голоцене наблюдается постепенное снижение численности радиолярий (рис. 2).

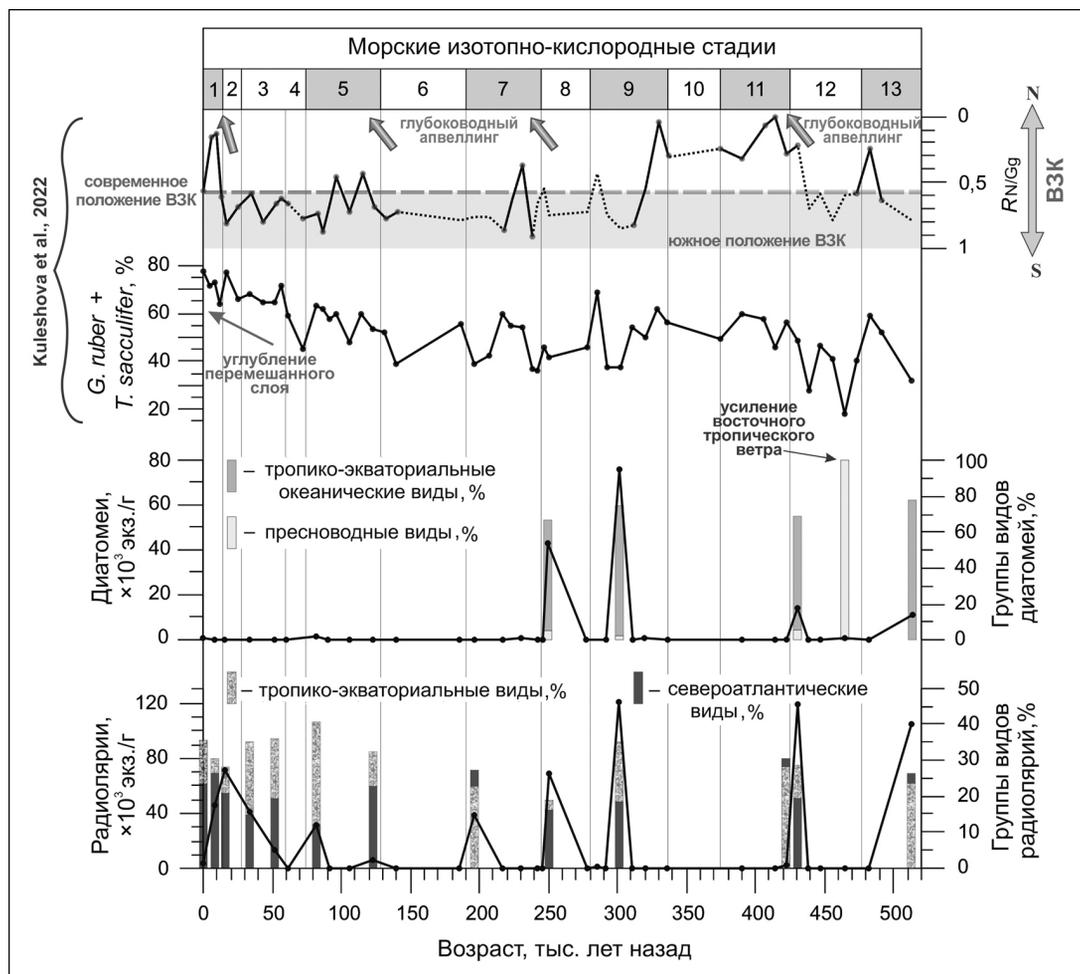


Рис. 2. Сопоставление кривых распределения общей численности и процентного содержания экологических групп диатомей и радиолярий с результатами анализа планктонных фораминифер (ПФ) [Kuleshova et al., 2022] в колонке АНС-33047.

Градиентными стрелками показаны интервалы развития глубоководного палеоапвеллинга, реконструированные по индексу $R_{N/Gg}$ [Kuleshova et al., 2022]. Пунктирные участки на кривой $R_{N/Gg}$ включают ненадежные значения, обусловленные интенсивным растворением карбонатных раковин планктонных фораминифер; штриховая линия отражает современное среднегодовое положение ВЗК согласно [Portilho-Ramos et al., 2017]

Fig. 2. Comparison of total abundance and relative abundances of the ecological species groups of diatoms and radiolarians with planktic foraminiferal data [Kuleshova et al., 2022] in the ANS-33047 core.

Gradient arrows indicate intervals of deep-water upwelling influence reconstructed from $R_{N/Gg}$ index in accordance with Kuleshova et al. [2022]. The dotted lines on the $R_{N/Gg}$ curve include possible unreliable values related to the influence of carbonate dissolution on planktic foraminiferal shells; the dashed line shows the modern annual ITCZ position, according to Portilho-Ramos et al. [2017]

Из 34 исследованных образцов диатомей встретились в девяти, и только в четырех пробах их число оказалось достаточным для количественного анализа и достоверной интерпретации данных. В пробе с глубины 480 см найдены в небольших количествах только пресноводные диатомей, и их содержание условно принято за 100%. Общая численность диатомовых водорослей варьирует от 0,4 до $75,9 \times 10^3$ экз./г (см. рис. 2, табл. 1). Таксономический состав комплексов диатомей представлен 44 видами, среди которых четыре относятся к пресноводным и 16 – к тропико-экваториальным (табл. 2). Тропико-экваториальная группа видов доминирует в осадках

колонки, составляя 67,2–78,2%. Содержание пресноводных видов в целом невелико и достигает в сообществе 5,4 и 6% в конце МИС 8 и 12 соответственно. Преобладание пресноводных диатомей в колонке АНС-33047 отмечается только в начале МИС 12. Солонатоводные и/или сублиторальные / неритические виды диатомей обнаружены не были. Кроме диатомей из вышеупомянутых групп встречены широко распространенные виды, обитающие не только в тропических, но и в умеренных широтах, но в данном исследовании для палеоокеанологических выводов мы используем данные по узко ограниченной в распространении тропико-экваториальной группе.

Таблица 1

Количественные данные по результатам анализа диатомей в колонке АНС-33047

Глубина, см	Возраст, тыс. лет назад	Общая численность, экз./г	Количество таксонов	Доля тропико-экваториальных видов в сообществе, %	Доля пресноводных видов в сообществе, %	МИС
0	0	481	2			1
20	9	0	0			1
40	16	0	0			2
60	34	0	0			3
80	52	0	0			3
100	61	0	0			4
120	82	1054	5			5
140	91	0	0			5
160	106	0	0			5
180	123	0	0			5
200	140	0	0			6
210	186	0	0			6
220	196	0	0			7
240	217	0	0			7
260	231	562	3			7
280	242	0	0			7
290	246	0	0			8
300	250	42 993	15	67,2	5,4	8
310	278	0	0			8
320	285	0	0			9
330	292	0	0			9
340	302	75 870	33	75,2	2,6	9
350	311	0	0			9
360	320	380	3			9
380	336	0	0			9
400	390	0	0			11
420	414	0	0			11
430	422	0	0			11
440	431	13 682	19	69,3	6	12
450	439	0	0			12
460	447	0	0			12
480	465	744	3	0	100	12
500	482	0	0			13
515	513	11 128	15	78,2	0,5	13

Таблица 2
Группы индикаторных видов диатомей
в колонке АНС-33047

Тропико-экваториальная группа видов
<i>Alveus marinus</i> (Grunow) Kaczmarek & Fryxell
<i>Asterolampra marylandica</i> (Ehrenberg)
<i>Asteromphalus arachne</i> (Brebisson) Ralfs
<i>Asteromphalus elegans</i> (Greville)
<i>Asteromphalus imbricatus</i> (Wallich)
<i>Azpeitia africanus</i> (Schmidt) Fryxell & Sims
<i>Azpeitia neocrenulata</i> (Van Landingham) Fryxell & Watkins
<i>Azpeitia nodulifera</i> (Schmidt) Fryxell & Sims
<i>Coscinodiscus lanceolatus</i> (Castracane)
<i>Fragilariopsis doliolus</i> (Wallich) Medlin & Sims
<i>Hemidiscus cuneiformis</i> (Wallich)
<i>Planktoniella sol</i> (Wallich) Schütt
<i>Rhizosolenia bergonii</i> (Peragallo)
<i>Rhizosolenia firma</i> (Karsten)
<i>Shionodiscus oestrupii</i> (Ostenfeld) Alverson, Kang & Theriot
<i>Thalassiosira lineata</i> (Jouse)
Пресноводная группа видов
<i>Aulacoseira granulata</i> (Ehrenberg) Simonsen
<i>Aulacoseira islandica</i> (O. Müller) Simonsen
<i>Nitzschia</i> sp.
<i>Synedra ulna</i> (Nitzsch) Ehrenberg

Радиолярии встречены в 18 пробах из 34 исследованных, однако проведение количественного анализа стало возможным только для 13 образцов с достаточным числом скелетов. Общая численность радиолярий меняется в пределах $0,3-120 \times 10^3$ экз./г (см. рис. 2, табл. 3). Непрерывное распределение раковин отмечается для последних 50 тыс. лет со средней численностью около 35×10^3 экз./г. Таксономический состав комплексов радиолярий представлен более чем 80 видами, среди них 19 родов относятся к тропико-экваториальной группе и 14 родов представляют североатлантическую микрофауну умеренного пояса (табл. 4). Доля тропико-экваториальных и североатлантических видов в сообществе радиолярий составляет 18,7–40,5 и 11,7–30,4% соответственно.

В горизонтах 300–301 см (около 250 тыс. лет назад) и 240–241 см (около 217 тыс. лет назад) обнаружено присутствие миоценовых радиолярий *Calocyclus* spp.

В осадках колонки АНС-33047 наблюдается неравномерное распределение диатомей и радиолярий (см. рис. 2). Присутствие раковин *Calocyclus* spp. в осадках возрастом около 250 и 217 тыс. лет, вероятно, обусловлено процессами переотложения осадочного материала придонными течениями.

Отсутствие или недостаточное количество кремневых микрофоссилий в большинстве изученных проб осложняют проведение палеорекоstructions. Поэтому для надежной интерпретации полученных данных в настоящем исследовании мы сравниваем их с ранее опубликованными сведениями о содержании экологически значимых видов планктонных фораминифер в колонке АНС-33047 [Kuleshova et al., 2022]. Так, вариации распределения тепловодных видов *Globigerinoides sacculifer* и *Globigerinoides ruber* применены в качестве индикатора изменения глубины перемешанного слоя (верхние 50–100 м): рост их процентного содержания свидетельствует о потеплении и углублении слоя. Кроме того, приведен индекс соотношения трех видов ПФ *Neogloboquadrina incompta*, *Neogloboquadrina dutertrei* и *Globigerinita glutinata*, отражающий смещения ВЗК в меридиональном направлении:

$$R_{N/Gg} = \frac{\% N. incompta + \% N. dutertrei}{\% N. incompta + \% N. dutertrei + \% G. glutinata}$$

Повышенные значения индекса свидетельствуют о миграции ВЗК на юг, к экватору, снижении температур и уменьшении глубины перемешанного слоя в районе исследования за счет усиления потоков воздуха, движущихся с востока на запад. Данные процессы сопровождалась поднятием богатых питательными веществами термоклинных вод к поверхности (активизация дивергенции). Понижение значений индекса, напротив, отражает миграцию ВЗК в северном направлении и углубление перемешанного слоя [Portilho-Ramos et al., 2017] над местом исследования. Установлено, что более выраженный глубоководный апвеллинг и уменьшение глубины перемешанного слоя над южной частью бассейна Зеленого Мыса предшествовали миграции ВЗК на север [Kuleshova et al., 2022].

Наблюдаемая низкая численность диатомей и радиолярий, а также соотношение основных видов в поверхностной пробе в целом согласуется с современными условиями распределения кремневых микрофоссилий в районе исследования [Nigrini, 1967; Goll, Björklund, 1971; Матуль, 1989]. К наиболее распространенным видам радиолярий можно отнести *Lithelius spiralis* и *Tetrapyle quadriloba*, в меньшем количестве обнаружены *Lithocircus reticulata*, *Octopyle stenozona* и *Panartus tehtrathalamus*. Среди диатомей встречены единичные створки видов *Azpeitia africanus* и *Azpeitia nodulifera*.

Зарегистрированная повышенная численность диатомей и радиолярий в пределах холодных интервалов (стадиалов) межледниковий МИС 13 (513 тыс. лет назад) и 9 (300 тыс. лет назад) (см. рис. 2), а также

во время Терминации V (на рубеже МИС 12/11, около 430 тыс. лет назад) и в конце МИС 8 (около 250 тыс. лет назад) свидетельствует о коротких событиях миграции кремневого пояса на север и о его присутствии

над южной частью бассейна Зеленого Мыса в период МИС 13–8. Увеличение численности радиолярий также отмечено в начале МИС 5 (около 123 тыс. лет назад) и в конце МИС 2 (около 16 тыс. лет назад).

Таблица 3

Количественные данные по результатам анализа радиолярий в колонке АНС-33047

Глубина, см	Возраст, тыс. лет назад	Общая численность, экз./г	Количество таксонов	Доля тропико-экваториальных видов в сообществе, %	Доля североатлантических видов в сообществе, %	МИС
0	0	3552	26	35,6	23,7	1
20	9	46 174	68	30,6	26,3	1
40	16	71 975	51	28,1	20,8	2
60	34	40 760	45	35,2	14,8	3
80	52	14 013	67	36,1	19,2	3
100	61	0	0			4
120	82	32 177	58	40,5	11,7	5
140	91	0	0			5
160	106	0	0			5
180	123	6667	52	32,2	23	5
200	140	0	0			6
210	186	0	0			6
220	196	38 511	62	23,3	27	7
240	217	324	8			7
260	231	0	0			7
280	242	0	0			7
290	246	42	1			8
300	250	69 410	45	18,7	16,1	8
310	278	337	5			8
320	285	1003	17			9
330	292	453	5			9
340	302	120 372	80	34,9	18,3	9
350	311	0	0			9
360	320	0	0			9
380	336	0	0			9
400	390	0	0			11
420	414	0	0			11
430	422	2982	26	28,3	30,4	11
440	431	119 049	77	28,7	19,4	12
450	439	0	0			12
460	447	0	0			12
480	465	0	0			12
500	482	0	0			13
515	513	104 609	74	23,7	26,5	13

Реконструируемые широтные смещения кремневого пояса около 430, 250, 123 и 16 тыс. лет назад сопровождались усилением глубоководного

палеоапвеллинга, которое, в свою очередь, приводило к повышению биологической продуктивности в фотическом слое (см. рис. 2). На формирование

глубоководного апвеллинга в районе исследования указывают данные микропалеонтологического анализа раковин планктонных фораминифер (ПФ) [Kuleshova et al., 2022]: рассчитанный индекс $R_{N/Gg}$ отражает крайнее южное положение ВЗК, предшествующее ее миграции на север. Согласно Шнайдеру с соавторами [Schneider et al., 2014], помимо сезонных миграций выделяют ледниково-межледниковые изменения положения ВЗК: во время холодных ледниковых эпох отмечены миграции ВЗК на юг, а во время теплых межледниковых – на север. Вероятно, в переходные интервалы от ледниковий к межледниковьям происходило смещение фронтальных зон, влиявшее на интенсивность палеоапвеллинга и палеопродуктивность поверхностного слоя над южной частью бассейна Зеленого Мыса.

Таблица 4

Группы индикаторных видов радиолярий в колонке АНС-33047

Тропико-экваториальная группа видов
<i>Anthocyrtidium ophirens</i> (Ehrenberg)
<i>Artostrobium auritus-australis</i> (Ehrenberg)
<i>Botryocyrtilis scutum</i> (Harting)
<i>Centrobotrys thermophila</i> (Petrushevskaya)
<i>Collosphaeridae</i> spp.
<i>Dictyocoryne profunda</i> (Ehrenberg)
<i>Euchitonia</i> spp.
<i>Lipmanella dictyoceras</i> (Haeckel)
<i>Lithocircus reticulata</i> (Ehrenberg)
<i>Octopyle stenozona</i> (Haeckel)
<i>Panartus tetrathalamus</i> (Haeckel)
<i>Pterocanium praetextum praetextum</i> (Ehrenberg)
<i>Pterocorys hertwigii</i> (Haeckel)
<i>Pterocorys minithorax</i> (Nigrini)
<i>Rhizosphaera</i> spp.
<i>Spongaster tetras tetras</i> (Ehrenberg)
<i>Tetrapyle quadriloba</i> (Haeckel)
<i>Tricolocampe cylindrica</i> (Haeckel)
<i>Zigocircus</i> spp.
Североатлантическая группа видов
<i>Actinomma boreale</i> (Cleve) / <i>A. leptodermum</i> (Joergensen)
<i>Artobotrys borealis</i> (Cleve)
<i>Artostrobium tumidulum</i> (Bailey)
<i>Artostrobus annulatus</i> (Bailey)
<i>Artostrobus joergenseni</i> (Petrushevskaya)
<i>Cornutella profunda</i> (Ehrenberg)
<i>Lithelius spiralis</i> (Haeckel)
<i>Lithocampe platycephala</i> (Ehrenberg)
<i>Lithomelissa setosa</i> (Joergensen)
<i>Lithomitra lineata</i> (Ehrenberg)
<i>Sethoconus tabulatus</i> (Haeckel)
<i>Siphocampe arachnea</i> (Ehrenberg)
<i>Spongodiscus resurgens</i> (Ehrenberg)
<i>Spongopyle osculosa</i> (Dreyer)

Следовательно, подъем холодных и обогащенных питательными веществами вод на поверхность при апвеллинге мог способствовать развитию сообществ радиолярий и диатомовых водорослей. Возможно, активизация глубоководного палеоапвеллинга имела место и около 513 и 300 тыс. лет назад. Однако реконструкция палеоокеанологических условий по комплексам ПФ в это время осложнена интенсивным растворением карбонатных раковин.

В работе, посвященной исследованию осадков в восточной части Атлантики, в районе Ангольского купола [Pokras, 1987], увеличение процентного содержания створок диатомей установлено в пределах ледниковых интервалов (МИС 2, 4 и 6) и стадиялов межледниковий (МИС 5b и 5d). Согласно автору, «вспышки» развития сообществ диатомовых водорослей являются результатом усиления пассатов и интенсификации систем апвеллингов в ответ на увеличение меридионального градиента температур поверхностных вод во время холодных событий.

В исследуемой колонке АНС-33047, отобранной вблизи Срединно-Атлантического хребта, влияние прибрежных апвеллингов значительно слабее. Как следствие, для района характерна низкая продуктивность, что отразилось на практически полном отсутствии диатомей в осадках после МИС 8 (последние 246 тыс. лет) и их спорадическом появлении в интервале МИС 13–8.

Различия в распределении диатомей и радиолярий в течение последних 246 тыс. лет могут объясняться тем, что фитопланктон более чувствителен к условиям среды его обитания и стремительно реагирует даже на ее незначительные изменения, в то время как ассоциация зоопланктона отражает сглаженный (усредненный) сигнал свойств водной толщи в целом [Boltovskoy et al., 1996; Racki, Cordey, 2000; Афанасьева и др., 2005]. Кроме того, по мнению исследователей [Anderson et al., 1990; Takahashi, 1991], многие виды радиолярий способны выживать в условиях пониженного содержания растворенного в воде кремния. Таким образом, они обладают повышенными адаптационными способностями и устойчивостью к неблагоприятным условиям по сравнению с диатомеями.

В колонке АНС-33047 среди экологических групп диатомей в МИС 13, 12/11, 9 и 8 доминирующее положение занимает тропико-экваториальный комплекс. Наиболее распространены виды рода *Azpeitia* (*A. africanus*, *A. neocrenulata*, *A. nodulifera*) и широкотропические *Alveus marinus*, *Planktoniella sol*, *Thalassiosira lineata*, *Hemidiscus cuneiformis*, *Shionodiscus oestrupii*. Пресноводный комплекс в этих горизонтах представлен единичными экземплярами *Aulacoseira granulata* и *Aulacoseira*

islandica. Только в начале МИС 12 (около 464 тыс. лет назад) отмечается преобладание пресноводных диатомей (*Aulacoseira granulata*, *Nitzschia* sp., *Synedra ulna*). В удаленную от берегов глубоководную область океана створки пресноводных видов, вероятно, принесены в составе золотого материала с африканского континента. Данный процесс широко проявляется в тропической и экваториальной Атлантике – в восточной и центральной частях акватории [Schrader et al., 1993; Lange et al., 1994; Treppke et al., 1996; Romero et al., 1999; 2000]. В качестве объяснения наблюдаемого масштабного переноса в МИС 12, судя по увеличению пресноводных диатомей в осадках колонки АНС-33047, может служить предполагаемое усиление тропического восточного ветра и активизация процессов дефляции, происшедших на фоне аридных условий во время холодного палеоклиматического события [Pokras, Mix, 1985; Romero et al., 1999]. Кроме того, активная атмосферная циркуляция могла действовать в тесной связи с интенсификацией экваториального апвеллинга во время четвертичных оледенений [Mix, Morey, 1996]. Влияние океанического апвеллинга на формирование повышенных концентраций взвешенного вещества в поверхностном слое открытой экваториально-тропической области Атлантики, в частности в районе Гвинейского купола, прослеживается в исследовании Е.С. Бубновой с соавторами [2020]. Авторы предполагают, что увеличение концентрации взвеси связано не только с активным переносом терригенных и органогенных частиц северо-восточными пассатами, но и с развитием в данном районе апвеллинга подповерхностных и промежуточных вод [Бубнова и др., 2020]. Занос пресноводных створок диатомей с речным стоком (например, Амазонки) представляется менее вероятным, поскольку неритические и сублиторальные виды в колонке АНС-33047 не обнаружены.

Среди экологических групп радиолярий тропико-экваториальные виды (главным образом, *T. quadriloba* и *Artostrobium auritus-australis*) характеризуются повышенным процентным содержанием в сравнении с североатлантическими представителями умеренного пояса (см. рис. 2, 3). Последние большей частью являются космополитами, обитающими в более холодных подповерхностных промежуточных водах [Матуль, 1989; Matul, Mohan, 2017]. Исключение составляют несколько проб с возрастом около 513, 422 и 196 тыс. лет, где доля североатлантических видов превышает тропико-экваториальные. В частности, в данных горизонтах в значительном количестве встречены *Artotrobus joergensenii*, *Cornutella profunda*, *Lithomitra lineata*, *L. spiralis*, характерные для умеренного пояса Северной Атлантики [Matul, Mohan, 2017]. Присутствие в осадках

колонки большего количества североатлантических видов радиолярий может свидетельствовать об усилении влияния более холодных глубинных вод на подповерхностную среду в районе исследования.

Непрерывное распределение раковин радиолярий в позднем плейстоцене – раннем голоцене (около 50–9 тыс. лет назад) может быть связано с постепенным углублением поверхностного (перемешанного) слоя и интенсификацией СЭП и СЭПП, циркулирующих в диапазонах глубин 0–100 и 100–500 м соответственно [Stramma, Schott, 1999]. Этот вывод согласуется с результатами микропалеонтологического анализа планктонных фораминифер [Kuleshova et al., 2022]: в пределах последних 50 тыс. лет наблюдается высокая относительная численность тепловодных видов *G. sacculifer* и *G. ruber*, которые доминируют в регионах с хорошо развитым перемешанным слоем, простирающимся ниже фотической зоны [Ravelo et al., 1990].

ВЫВОДЫ

Исследование распределения кремневых микрофоссилий по разрезу колонки АНС-33047 позволило реконструировать события интенсификации апвеллинга и повышения биологической продуктивности поверхностных вод в восточной экваториальной области Атлантического океана в интервале последних 513 тыс. лет.

Одновременное резкое увеличение численности диатомей и радиолярий в среднеплейстоценовых осадках (около 513, 430, 300 и 250 тыс. лет назад) и кратковременность этих изменений позволяют предположить эпизодическое проникновение в район формирования осадков высокопродуктивных вод экваториальной дивергенции при ее смещении и/или расширении, в которых могли развиваться сравнительно богатые сообщества фито- и зоопланктона.

Синхронные импульсные события повышенной аккумуляции створок диатомей и раковин радиолярий, наблюдаемые 513–250 тыс. лет назад, сменились в последние 246 тыс. лет отдельными интервалами роста доли зоопланктона на фоне существенного сокращения представителей фитопланктона в составе кремневых микрофоссилий. Низкая абсолютная концентрация диатомей вплоть до их полного отсутствия в верхней части разреза свидетельствует о пониженной продуктивности поверхностных вод у края экваториального пояса активного накопления диатомовых водорослей. Доминирующим компонентом кремнезема в донных осадках в это время были радиолярии, возможно, отражая большее влияние глубоководного палеоапвеллинга на подповерхностную среду, чем на условия в поверхностном слое. Непрерывное распределение раковин радиолярий в позднем плейсто-

цене – раннем голоцене могло быть связано с постепенным углублением верхнего перемешанного слоя и интенсификацией северной ветви Северного экваториального поверхностного и подповерхностного противотечений.

Скачок численности пресноводных видов диатомей, зафиксированный в осадках возрастом около

464 тыс. лет назад, по-видимому, связан с интенсивным переносом эолового материала с африканского континента. Подобный масштабный перенос мог являться результатом усиления тропического восточного ветра и активизации процессов дефляции, происходивших на фоне суровых засушливых условий во время холодного палеоклиматического события.

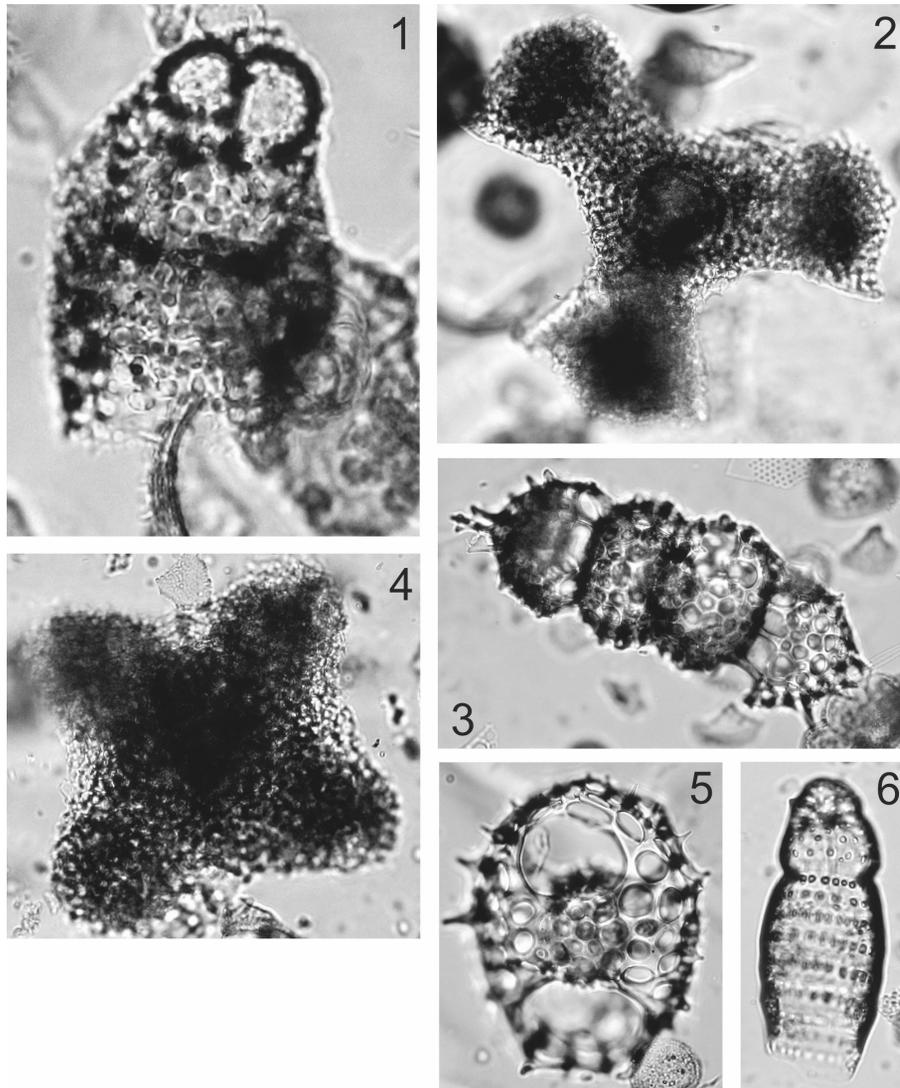


Рис. 3. Фотоснимки скелетов радиолярий из осадков колонки АНС-33047:

1 – *Botryocyrtis scutum* (Harting), 40–41 см; 2 – *Dictyocoryne profunda* Ehrenberg, 80–81 см; 3 – *Panartus tetrathalamus* Haeckel, 80–81 см; 4 – *Spongaster tetras tetras* Ehrenberg, 60–61 см; 5 – *Tetrapyle quadriloba* Haeckel group, 40–41 см; 6 – *Tricolocampe cylindrica* Haeckel, 40–41 см

Fig. 3. Light microscopic images of radiolarian skeletons obtained from the ANS-33047 core:

1 – *Botryocyrtis scutum* (Harting), 40–41 cm; 2 – *Dictyocoryne profunda* Ehrenberg, 80–81 cm; 3 – *Panartus tetrathalamus* Haeckel, 80–81 cm; 4 – *Spongaster tetras tetras* Ehrenberg, 60–61 cm; 5 – *Tetrapyle quadriloba* Haeckel group, 40–41 cm; 6 – *Tricolocampe cylindrica* Haeckel, 40–41 cm

Благодарности. Авторы выражают благодарность Е.П. Пономаренко и двум анонимным рецензентам за конструктивные замечания, позволившие улучшить данную статью. Экспедиционные исследования проведены в рамках госзадания ИО РАН (тема № FMWE-2021-0012), микропалеонтологический анализ диатомей выполнен при поддержке госзадания ИО РАН (тема № FMWE-2021-0006), микропалеонтологический анализ радиолярий и интерпретация данных выполнены при поддержке гранта РФФ № 19-17-00246.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Атлас микроорганизмов в донных осадках океанов (диатомеи, радиолярии, силикофлягелляты, кокколиты) / под ред. А.П. Жузе. М.: Наука, 1977. 196 с.
- Афанасьева М.С., Амон Э.О., Болтовской Д. Экология и биогеография радиолярий: новый взгляд на проблему. Часть 1. Экология и тафономия // Литосфера. 2005. № 3. С. 31–56.
- Бубнова Е.С., Капустина М.В., Кречик В.А., Сивков В.В. Распределение взвеси в поверхностном слое восточно-экваториальной Атлантики // Океанология. 2020. Т. 60. № 2. С. 259–267.
- Диатомовые водоросли СССР: ископаемые и современные. Т. 1 / под ред. А.И. Прошкина-Лавренко, З.И. Глезер, А.П. Жузе, И.В. Макарова, В.С. Шешуковой-Порецкой. Ленинград: Наука, 1974. 403 с.
- Кеннет Дж. Морская геология: в 2 т. / пер. с англ. М.: Мир, 1987. Т. 2. 384 с.
- Матиль А.Г. Распределение радиолярий в поверхностном слое осадков Северной Атлантики // Океанология. 1989. Т. 29. № 6. С. 992–998.
- Свальнов В.Н., Казарина Г.Х. Диатомовые илы среднего Каспия // Океанология. 2008. Т. 48. № 4. С. 634–640.
- Abelmann A., Brathauer U., Gersonde R., Sieger R., Zielinski U. Radiolarian-based transfer function for estimation of sea surface temperatures in the Southern Ocean (Atlantic sector), *Paleoceanography*, 1999, vol. 14, no. 3, p. 410–421.
- Abelmann A., Gowing M.M. Spatial distribution of living polycystine radiolarian taxa – baseline study for paleoenvironmental reconstruction in the Southern Ocean (Atlantic sector), *Marine Micropaleontology*, 1997, vol. 30, no. 1–3, p. 3–28.
- Anderson O.R., Bryan M., Bennett P. Experimental and observational studies of radiolarian physiological ecology: 4. Factors determining the distribution and survival of *Didymocyrtis tetrathalamus tetrathalamus* with implications for paleoecological interpretations, *Marine Micropaleontology*, 1990, vol. 16, no. 3–4, p. 155–167.
- Berger W.H. Planktonic foraminifera: selective solution and paleoclimatic interpretation, *Deep-Sea Research*, 1968, vol. 15, p. 31–43.
- Boltovskoy D., Correa N. Planktonic equatorial diversity troughs: fact or artifact? Latitudinal diversity gradients in Radiolaria, *Ecology*, 2017, vol. 98, no. 1, p. 112–124.
- Boltovskoy D., Uliana E., Wefer G. Seasonal variation in the flux of microplankton and radiolarian assemblage compositions in the northeastern tropical Atlantic at 2,195 m, *Limnology and Oceanography*, 1996, vol. 41, no. 4, p. 615–635.
- Bourlès B., Gouriou Y., Chuchla R. On the circulation in the upper layer of the western equatorial Atlantic, *Journal of Geophysical Research: Oceans*, 1999, vol. 104, no. C9, p. 21151–21170.
- Goll R.M., Bjørklund K.R. Radiolaria in surface sediments of the North Atlantic Ocean, *Micropaleontology*, 1971, vol. 17, no. 4, p. 434–454.
- Hein J.R., Parrish J.T. Distribution of siliceous deposits in space and time, *Siliceous sedimentary rock-hosted ores and petroleum*, 1987, p. 10–57.
- Hormann V., Lumpkin R., Perez R.C. A generalized method for estimating the structure of the equatorial Atlantic cold tongue: application to drifter observations, *Journal of Atmospheric and Oceanic Technology*, 2013, vol. 30, no. 8, p. 1884–1895.
- Kamikuri S.I., Motoyama I., Nishi H., Iwai M. Neogene radiolarian biostratigraphy and faunal evolution rates in the eastern equatorial Pacific ODP Sites 845 and 1241, *Acta Palaeontologica Polonica*, 2009, vol. 54, no. 4, p. 713–742.
- Kuleshova L.A., Bashirova L.D., Matul A.G. et al. Changing sea-surface and deep-water conditions in the southern Cape Verde Basin during the mid-Pleistocene to Holocene, *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*, 2022, vol. 594, p. 110921.
- Lange C.B., Treppke U.F., Fischer G. Seasonal diatom fluxes in the Guinea Basin and their relationships to trade winds, hydrography and upwelling events, *Deep Sea Research*, part I, *Oceanographic Research Papers*, 1994, vol. 41, no. 5–6, p. 859–878.
- Lisiecki L.E., Raymo M.E. A Pliocene – Pleistocene stack of 57 globally distributed benthic $\delta^{18}\text{O}$ records, *Paleoceanography*, 2005, vol. 20, PA1003, p. 1–17.
- Lisitzin A.P. The silica cycle during the last ice age, *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*, 1985, vol. 50, p. 241–270.
- Matul A., Mohan R. Distribution of polycystine radiolarians in bottom surface sediments and its relation to summer sea temperature in the high-latitude North Atlantic, *Frontiers in Marine Science*, 2017, vol. 4, p. 330.
- Mix A.C., Morey A.E. Climate Feedback and Pleistocene Variations in the Atlantic South Equatorial Current, *The South Atlantic: Present and Past Circulation*, G. Wefer, W.H. Berger, G. Siedler, D.J. Webb (eds.), Springer-Verlag, Berlin, Heidelberg, 1996, p. 503–525.
- Nigrini C. Radiolaria in pelagic sediments from the Indian and Atlantic Oceans, *Bulletin of the Scripps Institution of Oceanography*, University of California, San Diego, La Jolla, California, 1967, vol. 11, p. 1–125.
- Peterson R.G., Stramma L. Upper-level circulation in the South Atlantic Ocean, *Progress in oceanography*, 1991, vol. 26, no. 1, p. 1–73.
- Pokras E.M. Diatom record of late Quaternary climatic change in the eastern equatorial Atlantic and tropical Africa, *Paleoceanography*, 1987, vol. 2, no. 3, p. 273–286.
- Pokras E.M., Mix A.C. Eolian evidence for spatial variability of Late Quaternary climates in tropical Africa, *Quaternary Research*, 1985, vol. 24, no. 2, p. 137–149.
- Portilho-Ramos R.C., Chiessi C.M., Zhang Y. et al. Coupling of equatorial Atlantic surface stratification to glacial shifts in the tropical rainbelt, *Scientific Reports*, 2017, vol. 7, p. 1561.
- Racki G., Cordey F. Radiolarian palaeoecology and radiolarites: is the present the key to the past? *Earth-Science Reviews*, 2000, vol. 52, no. 1–3, p. 83–120.
- Ravelo A.C., Fairbanks R.G., Philander S.G.H. Reconstructing tropical Atlantic hydrography using planktonic foraminifera and an ocean model, *Paleoceanography*, 1990, vol. 5, no. 3, p. 409–431.
- Romero O.E., Lange C.B., Fischer G., Treppke U.F., Wefer G. Variability in Export Production Documented by Downward Fluxes and Species Composition of Marine Planktic Diatoms: Observations from the Tropical and Equatorial

- Atlantic, *Use of Proxies in Paleoceanography*, G. Fischer, G. Wefer (eds.), Springer, Berlin, Heidelberg, 1999, p. 365–392.
- Romero O.E., Fischer G., Lange C.B., Wefer G. Siliceous phytoplankton of the western equatorial Atlantic: sediment traps and surface sediments, *Deep Sea Research, part II, Topical Studies in Oceanography*, 2000, vol. 47, no. 9–11, p. 1939–1959.
- Sarmiento J.L., Gruber N. *Ocean Biogeochemical Dynamics*, Princeton, Woodstock, Princeton University Press, 2006, 503 p.
- Schneider T., Bischoff T., Haug G.H. Migrations and dynamics of the intertropical convergence zone, *Nature*, 2014, vol. 513, p. 45–53.
- Schrader H., Swanberg I.L., Burckle L.H., Grønlien L. Diatoms in recent Atlantic (20° S to 70° N latitude) sediments: abundance patterns and what they mean, *Twelfth International Diatom Symposium, Developments in Hydrobiology*, H. van Dam (ed.), Springer, Dordrecht, 1993, vol. 90, p. 129–135.
- Stramma L., Hüttl S., Schafstall J. Water masses and currents in the upper tropical northeast Atlantic off northwest Africa, *Journal of Geophysical Research: Oceans*, 2005, vol. 110, no. 12, C12006.
- Stramma L., Schott F. The mean flow field of the tropical Atlantic Ocean, *Deep-Sea Research, part II, Topical Studies in Oceanography*, 1999, vol. 46, no. 1–2, p. 279–303.
- Takahashi K. Radiolaria: flux, ecology, and taxonomy in the Pacific and Atlantic, *Ocean Biocoenosis Series*, S. Honjo (ed.), Woods Hole Oceanographic Institution Press, 1991, no. 3, p. 1–303.
- Treppke U.F., Lange C.B., Wefer G. Vertical fluxes of diatoms and silicoflagellates in the eastern equatorial Atlantic, and their contribution to the sedimentary record, *Marine Micropaleontology*, 1996, vol. 28, no. 1, p. 73–96.
- Tubul Y., Koren I., Altaratz O. The tropical Atlantic surface wind divergence belt and its effect on clouds, *Earth System Dynamics*, 2015, vol. 6, no. 2, p. 781–788.
- Vilela I., Araujo M., Tyaquicã P., Veleda D. Empirical orthogonal function analysis of satellite-derived currents in the tropical Atlantic, *Tropical oceanography*, 2018, vol. 46, no. 2, p. 1–24.
- Zielinski U., Gersonde R., Sieger R., Fütterer D. Quaternary surface water temperature estimations: Calibration of a diatom transfer function for the Southern Ocean, *Paleoceanography*, 1998, vol. 13, no. 4, p. 365–383.

Поступила в редакцию 01.10.2022

После доработки 25.02.2023

Принята к публикации 24.05.2023

QUATERNARY SILICEOUS MICROFOSSILS OF THE EQUATORIAL ATLANTIC AND THEIR ROLE FOR PALEOCEANOGRAPHIC RECONSTRUCTIONS

L.A. Kuleshova¹, A.G. Matul², G.H. Kazarina³, L.D. Bashirova⁴

^{1–4} Shirshov Institute of Oceanology

⁴ Immanuel Kant Baltic Federal University, Director of the Geoecology and Marine Environmental Management Centre

¹ Laboratory of the Atlantic Geology, Junior Scientific Researcher; e-mail: lubov_kuleshova@mail.ru

² Head of the Paleocology and Biostratigraphy Laboratory, Chief Scientific Researcher, D.Sc. in Geology and Mineralogy; e-mail: amatul@mail.ru

³ Laboratory of Paleocology and Biostratigraphy, Leading Scientific Researcher, Ph.D. in Geography; e-mail: gkazarina@mail.ru

⁴ Deputy Director of the Atlantic Branch IO RAS for Scientific Work, Head of the Laboratory for Geology of the Atlantic, Ph.D. in Geology and Mineralogy; e-mail: bas_leila@mail.ru

The paper presents the quantitative and taxonomic analysis of siliceous microfossils (diatoms and radiolarians) of the ANS-33047 deep-sea core (08°16,380' N, 31°42,870' W, 4027 mbsl, 5,16 mbsf), from the southern part of the Cape Verde Basin in the eastern equatorial Atlantic. We recognized two groups of radiolarians representing typical tropical-equatorial and temperate North Atlantic microfauna. The assemblage of fossil diatoms includes tropical-equatorial species, as well as freshwater diatoms which indicate the aeolian transfer of particulate matter from Africa. Sporadic distribution of diatoms and radiolarians indicates pulsatile character of silica accumulation in the equatorial zone during the Quaternary, i.e. intermittent periods with relatively intense and definitely weak silica accumulation. Both diatoms and radiolarians were dominant silica producers during the short intervals of marine isotope stages (MIS) 13–8. Their higher concentrations at ca. 513, 430, 300, and 250 ka probably reflect the penetration of highly productive waters of the Equatorial Divergence into the study area. Low numbers of diatoms coupled with the radiolarian abundance during some intervals of MIS 7–1 are probably the evidence of less productive conditions in the surface water layer and the alternating influence of deep-water paleo-upwellings, primarily on the subsurface. The peak of the freshwater diatoms at ca. 464 ka (MIS 12) indicates the possible intensification of deflation processes and the Tropical Easterly Jet transporting aeolian dust from African arid areas to the Atlantic Ocean.

Keywords: the Quaternary, diatoms, radiolarians, sedimentation, equatorial silica belt, the Cape Verde Basin

Acknowledgements. The authors are grateful to E.P. Ponomarenko and two anonymous reviewers for constructive comments, contributing to the improvement of the article. Field research was carried out under the state assignment of IO RAS (theme No. FMWE-2021-0012); study of diatoms was supported by the state assignment of IO RAS (theme No. FMWE-2021-0006); study of radiolarians and interpretation of the data were financially supported by the Russian Science Foundation (project No. 19-17-00246).

REFERENCES

- Abelmann A., Brathauer U., Gersonde R., Sieger R., Zielinski U. Radiolarian-based transfer function for estimation of sea surface temperatures in the Southern Ocean (Atlantic sector), *Paleoceanography*, 1999, vol. 14, no. 3, p. 410–421.
- Abelmann A., Gowing M.M. Spatial distribution of living polycystine radiolarian taxa – baseline study for paleoenvironmental reconstruction in the Southern Ocean (Atlantic sector), *Marine Micropaleontology*, 1997, vol. 30, no. 1–3, p. 3–28.
- Afanasyeva M.S., Amon E.O., Boltovskoy D. Radiolarian ecology and biogeography: new vision of the problem, part 1, Ecology and taphonomy, *Litosfera*, 2005, no. 3, p. 31–56.
- Anderson O.R., Bryan M., Bennett P. Experimental and observational studies of radiolarian physiological ecology: 4. Factors determining the distribution and survival of *Didymocystis tetrathalamus tetrathalamus* with implications for paleoecological interpretations, *Marine Micropaleontology*, 1990, vol. 16, no. 3–4, p. 155–167.
- Atlas mikroorganizmov v donnykh osadkakh okeanov (diatomei, radiolyarii, silikoflyagellyaty, kokkolity)* [Atlas of microorganisms in bottom sediments of the oceans (diatoms, radiolarians, silicoflagellates and coccoliths)], A.P. Jouse (ed.), Moscow, Nauka Publ., 1977, 196 p. (In Russian)
- Berger W.H. Planktonic foraminifera: selective solution and paleoclimatic interpretation, *Deep-Sea Research*, 1968, vol. 15, p. 31–43.
- Boltovskoy D., Correa N. Planktonic equatorial diversity troughs: fact or artifact? Latitudinal diversity gradients in Radiolaria, *Ecology*, 2017, vol. 98, no. 1, p. 112–124.
- Boltovskoy D., Uliana E., Wefer G. Seasonal variation in the flux of microplankton and radiolarian assemblage compositions in the northeastern tropical Atlantic at 2,195 m, *Limnology and Oceanography*, 1996, vol. 41, no. 4, p. 615–635.
- Bourlès B., Gouriou Y., Chuchla R. On the circulation in the upper layer of the western equatorial Atlantic, *Journal of Geophysical Research: Oceans*, 1999, vol. 104, no. C9, p. 21151–21170.
- Bubnova E.S., Kapustina M.V., Krechik V.A., Sivkov V.V. Suspended matter distribution in the surface layer of the East Equatorial Atlantic, *Oceanology*, 2020, vol. 60, no. 2, p. 228–235.
- Diatomovye vodorosli SSSR: iskopaemye i sovremennye, t. 1* [The diatoms of the USSR: fossil and recent, vol. I], A.I. Proshkina-Lavrenko, S.I. Gleser, A.P. Jouse, I.V. Markarova, V.S. Sheshukova-Poretzkaya (eds.), Leningrad, Nauka Publ., 1974, 403 p. (In Russian)
- Goll R.M., Bjørklund K.R. Radiolaria in surface sediments of the North Atlantic Ocean, *Micropaleontology*, 1971, vol. 17, no. 4, p. 434–454.
- Hein J.R., Parrish J.T. Distribution of siliceous deposits in space and time, *Siliceous sedimentary rock-hosted ores and petroleum*, 1987, p. 10–57.
- Hormann V., Lumpkin R., Perez R.C. A generalized method for estimating the structure of the equatorial Atlantic cold tongue: application to drifter observations, *Journal of Atmospheric and Oceanic Technology*, 2013, vol. 30, no. 8, p. 1884–1895.
- Kamikuri S.I., Motoyama I., Nishi H., Iwai M. Neogene radiolarian biostratigraphy and faunal evolution rates in the eastern equatorial Pacific ODP Sites 845 and 1241, *Acta Palaeontologica Polonica*, 2009, vol. 54, no. 4, p. 713–742.
- Kennett J. *Marine Geology*, Englewood Cliffs, N.J., Prentice-Hall, 1982. 813 p.
- Kuleshova L.A., Bashirova L.D., Matul A.G. et al. Changing sea-surface and deep-water conditions in the southern Cape Verde Basin during the mid-Pleistocene to Holocene, *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*, 2022, vol. 594, p. 110921.
- Lange C.B., Treppke U.F., Fischer G. Seasonal diatom fluxes in the Guinea Basin and their relationships to trade winds, hydrography and upwelling events, *Deep Sea Research, part I, Oceanographic Research Papers*, 1994, vol. 41, no. 5–6, p. 859–878.
- Lisiecki L.E., Raymo M.E. A Pliocene–Pleistocene stack of 57 globally distributed benthic $\delta^{18}\text{O}$ records, *Paleoceanography*, 2005, vol. 20, PA1003, p. 1–17.
- Lisitzin A.P. The silica cycle during the last ice age, *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*, 1985, vol. 50, p. 241–270.
- Matul A., Mohan R. Distribution of polycystine radiolarians in bottom surface sediments and its relation to summer sea temperature in the high-latitude North Atlantic, *Frontiers in Marine Science*, 2017, vol. 4, p. 330.
- Matul A.G. The distribution of radiolarians in the surface layer of North Atlantic bottom sediments, *Oceanology*, 1989, vol. 29, no. 6, p. 740–745.
- Mix A.C., Morey A.E. Climate Feedback and Pleistocene Variations in the Atlantic South Equatorial Current, G. Wefer, W.H. Berger, G. Siedler, D.J. Webb (eds.), *The South Atlantic: Present and Past Circulation*, Springer-Verlag, Berlin, Heidelberg, 1996, p. 503–525.
- Nigrini C. Radiolaria in pelagic sediments from the Indian and Atlantic Oceans, *Bulletin of the Scripps Institution of Oceanography*, University of California, San Diego, La Jolla, California, 1967, vol. 11, p. 1–125.
- Peterson R.G., Stramma L. Upper-level circulation in the South Atlantic Ocean, *Progress in oceanography*, 1991, vol. 26, no. 1, p. 1–73.
- Pokras E.M. Diatom record of late Quaternary climatic change in the eastern equatorial Atlantic and tropical Africa, *Paleoceanography*, 1987, vol. 2, no. 3, p. 273–286.
- Pokras E.M., Mix A.C. Eolian evidence for spatial variability of Late Quaternary climates in tropical Africa, *Quaternary Research*, 1985, vol. 24, no. 2, p. 137–149.
- Portillo-Ramos R.C., Chiessi C.M., Zhang Y. et al. Coupling of equatorial Atlantic surface stratification to glacial

- shifts in the tropical rainbelt, *Scientific Reports*, 2017, vol. 7, p. 1561.
- Racki G., Cordey F. Radiolarian palaeoecology and radiolarites: is the present the key to the past? *Earth-Science Reviews*, 2000, vol. 52, no. 1–3, p. 83–120.
- Ravelo A.C., Fairbanks R.G., Philander S.G.H. Reconstructing tropical Atlantic hydrography using planktonic foraminifera and an ocean model, *Paleoceanography*, 1990, vol. 5, no. 3, p. 409–431.
- Romero O.E., Fischer G., Lange C.B., Wefer G. Siliceous phytoplankton of the western equatorial Atlantic: sediment traps and surface sediments, *Deep Sea Research, part II, Topical Studies in Oceanography*, 2000, vol. 47, no. 9–11, p. 1939–1959.
- Romero O.E., Lange C.B., Fischer G., Treppke U.F., Wefer G. Variability in Export Production Documented by Downward Fluxes and Species Composition of Marine Planktic Diatoms: Observations from the Tropical and Equatorial Atlantic, G. Fischer, G. Wefer (eds.), *Use of Proxies in Paleoclimatology*, Springer, Berlin, Heidelberg, 1999, p. 365–392.
- Sarmiento J.L., Gruber N. *Ocean Biogeochemical Dynamics*, Princeton, Woodstock, Princeton University Press, 2006, p. 1–503.
- Schneider T., Bischoff T., Haug G.H. Migrations and dynamics of the intertropical convergence zone, *Nature*, 2014, vol. 513, p. 45–53.
- Schrader H., Swanberg I.L., Burckle L.H., Grønlien L. Diatoms in recent Atlantic (20° S to 70° N latitude) sediments: abundance patterns and what they mean, H. van Dam (ed.), *Twelfth International Diatom Symposium. Developments in Hydrobiology*, Springer, Dordrecht, 1993, vol. 90, p. 129–135.
- Stramma L., Hüttl S., Schafstall J. Water masses and currents in the upper tropical northeast Atlantic off northwest Africa, *Journal of Geophysical Research: Oceans*, 2005, vol. 110, no. 12, C12006.
- Stramma L., Schott F. The mean flow field of the tropical Atlantic Ocean, *Deep-Sea Research, part II, Topical Studies in Oceanography*, 1999, vol. 46, no. 1–2, p. 279–303.
- Sval'nov V.N., Kazarina G.Kh. Diatomaceous oozes of the Middle Caspian Sea, *Oceanology*, 2008, vol. 48, no. 4, p. 588–594.
- Takahashi K. Radiolaria: flux, ecology, and taxonomy in the Pacific and Atlantic, S. Honjo (ed.), *Ocean Biocoenosis Series*, Woods Hole Oceanographic Institution Press, 1991, p. 1–303.
- Treppke U.F., Lange C.B., Wefer G. Vertical fluxes of diatoms and silicoflagellates in the eastern equatorial Atlantic, and their contribution to the sedimentary record, *Marine Micropaleontology*, 1996, vol. 28, no. 1, p. 73–96.
- Tubul Y., Koren I., Altaratz O. The tropical Atlantic surface wind divergence belt and its effect on clouds, *Earth System Dynamics*, 2015, vol. 6, no. 2, p. 781–788.
- Vilela I., Araujo M., Tyaquicã P., Veleza D. Empirical orthogonal function analysis of satellite-derived currents in the tropical Atlantic, *Tropical oceanography*, 2018, vol. 46, no. 2, p. 1–24.
- Zielinski U., Gersonde R., Sieger R., Fütterer D. Quaternary surface water temperature estimations: Calibration of a diatom transfer function for the Southern Ocean, *Paleoceanography*, 1998, vol. 13, no. 4, p. 365–383.

Received 01.10.2022

Revised 25.02.2023

Accepted 24.05.2023