

УДК 551.46

Е. П. Пономаренко, Л. А. Кулешова

**ПАЛЕОЭКОЛОГИЧЕСКИЕ УСЛОВИЯ ГДАНЬСКОГО БАССЕЙНА
В ГОЛОЦЕНЕ ПО ДАННЫМ КОМПЛЕКСНОГО АНАЛИЗА
КОРОТКИХ СЕДИМЕНТАЦИОННЫХ КОЛОНОК**

69

Работа направлена на реконструкцию палеоэкологических обстановок, существовавших в Гданьском бассейне Балтийского моря в позднем голоцене. Особенность данного водоема заключается в том, что гидрологические и гидрохимические условия его изолированного придонного слоя находятся под влиянием водообмена с Северным морем, имеющим сообщение с Мировым океаном. Информация об условиях среды в прошлом необходима для понимания наблюдаемых изменений экосистемы Балтийского моря, выявления естественной и антропогенной составляющих этих изменений, а также составления надежных прогнозов. Изменение природных обстановок находит свое отражение в составе донных отложений водоемов. На основе комплексного изучения материала трех коротких седиментационных колонок, в том числе литологического, микропалеонтологического и геохимического, были восстановлены условия осадконакопления в Гданьском бассейне в послиторинговую стадию развития Балтийского моря. С учетом корреляции данных анализа осадков с опубликованными результатами реконструкций установлено: осадки исследуемых колонок были сформированы в течение последних трех тысячелетий (от Римского теплого периода до Современного периода потепления). Активизация водообмена между Балтийским и Северным морями зарегистрирована во время, предшествующее Римскому теплотому периоду, в течение его самого, Темных веков и Средневекового климатического оптимума. Периоды потепления климата, характеризующиеся увеличением продуктивности поверхностных вод и гипоксией придонных вод, соответствуют Римскому теплотому периоду, Средневековому климатическому оптимуму и Современному потеплению.

The article is aimed at reconstructing the paleoecological conditions in the Gdansk Basin of the Baltic Sea in the Late Holocene. The hydrological and hydrochemical conditions of its isolated bottom layer are strongly influenced by water exchange with the North Sea, which is connected to the World Ocean. Information on environmental conditions in the past is necessary to understand the observed changes in the Baltic Sea ecosystem, to identify the natural and anthropogenic components of these changes, as well as to make reliable forecasts. Changes in natural conditions are reflected in the composition of bottom sediments. Based on the complex study of three short sediment cores, including lithological, micropaleontological and geochemical analysis, the environmental conditions in the Gdansk basin in the Post-Litorina stage



of the Baltic Sea were reconstructed. According to the correlation of sediment analysis data with published reconstruction results, the sediments of the studied cores were formed during the last three millennia (from the Roman Warm Period to the Modern Warm Period). Intensified water exchange between the Baltic and North Seas was recorded before the Roman Warm Period, during the Roman Warm Period itself, the Dark Ages and during the Medieval Climate Optimum. Periods of climate warming, characterized by an increase in surface water productivity and bottom water hypoxia, correspond to the Roman Warm Period, the Medieval Climatic Optimum, and the Modern Warm Period.

Ключевые слова: Балтийское море, затоки североморских вод, придонная циркуляция, потери при прокаливании, атмосферная циркуляция, бентосные фораминиферы.

Keywords: Baltic Sea, North Sea water inflows, bottom circulation, loss on ignition, atmospheric circulation, benthic foraminifera.

Введение

Балтийское море характеризуется сильной и устойчивой двухслойной стратификацией. Наличие пикноклина, разделяющего поверхностный и глубинный слои, затрудняет или делает невозможным процесс вертикального перемешивания. Это приводит к тому, что гидрохимические условия изолированного придонного слоя находятся под влиянием спорадических затоков соленых, обогащенных кислородом вод Северного моря. Соленость придонных вод и насыщение их кислородом оказывают ключевое воздействие на развитие и состояние бентосных экосистем [14, р. 62]. Режим водообмена между Балтийским и Северным морями формируется под влиянием атмосферных условий. В первую очередь это изменения положения центров действия атмосферы, отражающих изменения глобальной атмосферной циркуляции [15, р. 704]. Другими факторами, обуславливающими вариации содержания кислорода в придонных водах, являются климатические изменения, а также антропогенная эвтрофикация [7, р. 26; 18, р. 1184; 19, р. 873]. Отсутствие длинных рядов гидрологических данных не позволяет ученым сформировать единого мнения относительно современной динамики затоков [25, р. 152–155], механизма их формирования [13, р. 123–125], а также однозначно ответить на вопрос, уменьшится или увеличится количество затоков в долгосрочной перспективе под влиянием климатических изменений и колебаний уровня моря. Комплексное изучение колоннок донных отложений предоставляет информацию об условиях среды в прошлом, которая необходима для понимания изменений экосистемы Балтийского моря, выявления естественной составляющей этих изменений и прогнозирования будущего состояния экосистемы в контексте меняющегося климата.

Данные о распределении бентосных фораминифер (БФ) в колонках донных отложений являются источником информации об изменении



придонного водообмена между Балтийским и Северным морями в прошлом. Однако большинство исследований, выполненных в Балтийском море, направлены на реконструкцию солености поверхностного слоя воды [3, р. 240–245; 9, р. 415–418; 26, р. 102–108]. Среди опубликованных работ только И. Бродневич [6, р. 131–260], Г. Лутц [23, р. 75–142], Х.М. Саидова [2, с. 215–232], Н.П. Лукашина [22, р. 282–288], Е.М. Емельянов и Н.П. Лукашина [11, р. 37–41] и совсем недавно А.Т. Котилайнен и соавторы [20, р. 60–68], А. Бинжевска и соавторы [4, р. 297–310], а также К. Хойслер и соавторы [16, р. 111–128] рассмотрели долгосрочные изменения солености придонных вод в Балтийском море по данным изучения фораминифер в седиментационных колонках. Столь малое число работ можно объяснить проблемой растворения карбонатных раковин, вызванной высокой агрессивностью вод.

Также мало изучено распределение БФ по разрезам осадочных колонок в исключительной экономической зоне (ИЭЗ) России в Балтийском море (например, [2, с. 215–232; 11, р. 37–14; 22, р. 282–288]). Альтернативным методом, который был использован для реконструкции затоков в ИЭЗ России в Балтийском море, является расчет изменения солености придонных вод по содержанию брома в донных осадках (например, [12, р. 13–21]). В свою очередь, в работах [4, р. 297–310; 6, р. 131–260] был показан потенциал изучения комплексов фораминифер с целью реконструкции палеоокеанологических условий в Балтийском море. Однако авторами была подчеркнута необходимость применения альтернативного способа пробообработки – просмотра проб под биноклем во влажном состоянии для подсчета не только раковин, но и органических останков [4, р. 299–302; 5, р. 178–180; 8, р. 1–9].

Цель настоящей работы – реконструкция условий среды Гданьского бассейна в позднем голоцене, обусловленных вариациями интенсивности затоков североморских вод в контексте изменения атмосферной циркуляции и климата.

Описание района исследования

Гданьский бассейн расположен в юго-восточной части Балтийского моря и включает в себя мелководные прибрежные плато, Гданьскую впадину, оконтуренную изобатой 80 м, и Гданьско-Готландский порог, отделяющий Гданьскую впадину от Готландского бассейна. Средняя глубина бассейна – около 40 м, максимальная глубина – 118 м (Гданьская впадина) [10, р. 24–102]. Максимальные глубины, отмеченные на Гданьско-Готландском пороге, составляют 86 м. Позднечетвертичные осадки Гданьского бассейна представлены тремя основными литостратиграфическими единицами: ледниковыми глинами и алевролитами (осадки Балтийского ледникового озера), переходными глинами (осадки Иольдиевого моря и Анцилового озера) и послеледниковыми илами Литоринового моря [30, р. 15–138; 32, р. 189–192]. Водная толща бассейна – двухслойная, состоит из поверхностного (деятельного) слоя и



глубинного. Граница между поверхностным и глубинным слоями в Гданьской впадине расположена на глубине 70–75 м [1, с. 39–109]. Гидрохимические условия придонного слоя вод формируются под влиянием затоков плотных соленых вод Северного моря, распространяющихся в глубокие слои и формирующих сильный вертикальный градиент солености, а также устойчивую стратификацию [24, р. 10–32; 25, р. 152–140]. Из-за сложной топографии дна Балтийского моря проникновение вод затоков ограничено, а эффект их воздействия всегда уменьшается с удалением от Датских проливов за счет перемешивания с водами Балтийского моря [24, р. 10–32]. Основная ветвь вод Северного моря попадает из Арконского в Борнхольмский бассейн через пролив Хамрарне (Bornholm Gatt). Далее воды залива распространяются по Слупскому желобу, затем, минуя его, основной поток направляется в Готландский бассейн, а небольшое ответвление попадает в Гданьский бассейн [24, р. 10–32; 25, р. 152–166]. Температура вод Гданьского бассейна колеблется в пределах 3,9–8,7°С в придонном слое и 5–17,8°С – в поверхностном. Соленость придонных вод изменяется от 10,4 до 14,4 епс [1, с. 39–109; 10, р. 24–102]. Ограниченный водообмен между Гданьским бассейном и остальной частью Балтийского моря, а также поступление большого количества органического вещества в донные осадки приводит к частому формированию бескислородных условий в придонном слое воды и сероводородному заражению вод.

Материал и методы исследования

В настоящем исследовании изучены седиментационные колонки АБП-43026 (55.4134 с.ш., 19.4236 в.д.), АБП-43035 (55.0588 с.ш., 19.1356 в.д.) и АБП-43105 (55.0166 с.ш., 19.5637 в.д.), отобранные на трех станциях в Гданьском бассейне в 43-м рейсе НИС «Академик Борис Петров» в июле и августе 2018 г. Материал колонок получен с помощью короткой геологической трубки конструкции Ниёмисто, применение которой позволяет получить секцию с ненарушенным верхним слоем донных осадков [28, р. 1–10], что является необходимым условием при изучении современных изменений экосистем. Колонки АБП-43035 и АБП-43105 отобраны в Гданьской впадине на глубинах 104 и 105 м соответственно, колонка АБП-43026 отобрана на Гданьско-Готландском пороге на глубине 78 м (рис. 1). Такое расположение колонок позволяет изучить пространственную неоднородность влияния затоков, а также воздействие изменения климата на экосистему Гданьского залива, обусловленную рельефом. Мощность отобранных осадков составляет 55 см (АБП-43026), 41 см (АБП-43035) и 49 см (АБП-43105). На борту корабля было выполнено фотографирование и подробное литологическое описание донных отложений: определение цвета осадка по международной цветовой шкале Munsell Soil Color Chart, а также определение гранулометрического состава и текстуры осадков. После описания колонки были непрерывно разобраны на образцы мощностью 1 см.

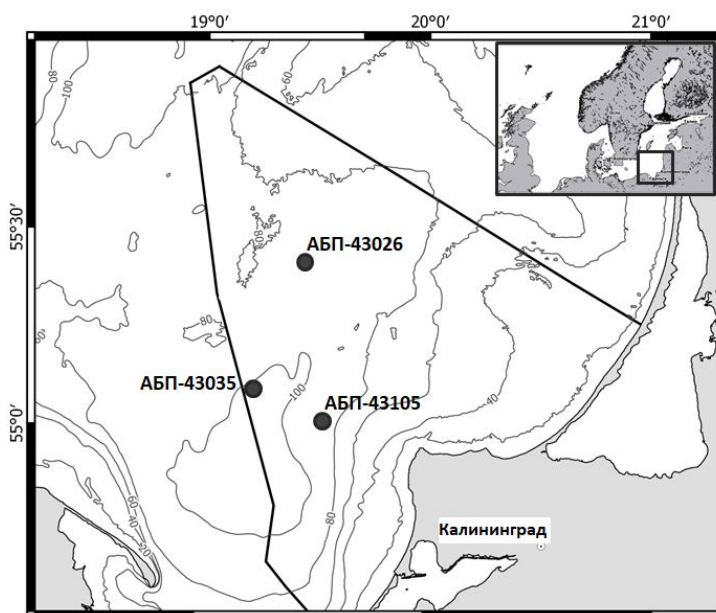


Рис. 1. Местоположение станций отбора колонок донных осадков

Определение потерь при прокаливании

Для определения потерь при прокаливании (ППП) отобраны пробы непрерывно с шагом 2 см, за исключением верхних 6 см (поскольку материала оказалось недостаточно для определения ППП из-за использования верхней части осадка в других видах анализов). Для определения величины ППП 1 г осадка помещали в фарфоровый тигель и сжигали в муфельной печи при 550°С в течение 3 ч. Далее пробу повторно взвешивали, после чего продолжали сжигание еще примерно 2 ч до достижения постоянного веса. Затем рассчитывали потерю веса от первоначального значения в процентах. Для контроля повторяемости результата в серии из 30 образцов в 2 пробах определение ППП проводили дважды. В донных отложениях Балтийского моря значения ППП обеспечивают оценку содержания общего органического углерода [17, р. 3–17; 21, р. 175–188].

Микропалеонтологический анализ

Для определения количественного и видового состава бентосных фораминифер пробы донных осадков отбирались непрерывно с шагом 2 см. Микропалеонтологический анализ выполнялся с использованием просеянной влажной фракции >63 мкм. Такой метод пробоподготовки позволяет сохранить раковины хрупких агглютинированных фораминифер, которые в Балтийском море доминируют в популяции, а также учесть мелкие особи, характерные для солоноватоводных водоемов.



Кроме того, при подсчете количества раковин во влажном состоянии возможно учитывать растворившиеся карбонатные фораминиферы по наличию органических останков внутренних оболочек раковин [4, р. 229–302; 5, р. 178–180; 8, р. 1–9]. Поэтому исследование БФ во влажных пробах особенно важно для осадков Балтийского моря, характеризующихся низкими концентрациями раковин и высокой степенью растворения карбонатного материала. Концентрация фораминифер определялась как количество раковин на грамм влажного осадка (р/г) в верхних 40 см колонок. Ниже по разрезу осадок был сильно уплотнен, что требует другого процесса пробоподготовки и анализа ввиду крайне низких концентрации раковин.

Результаты

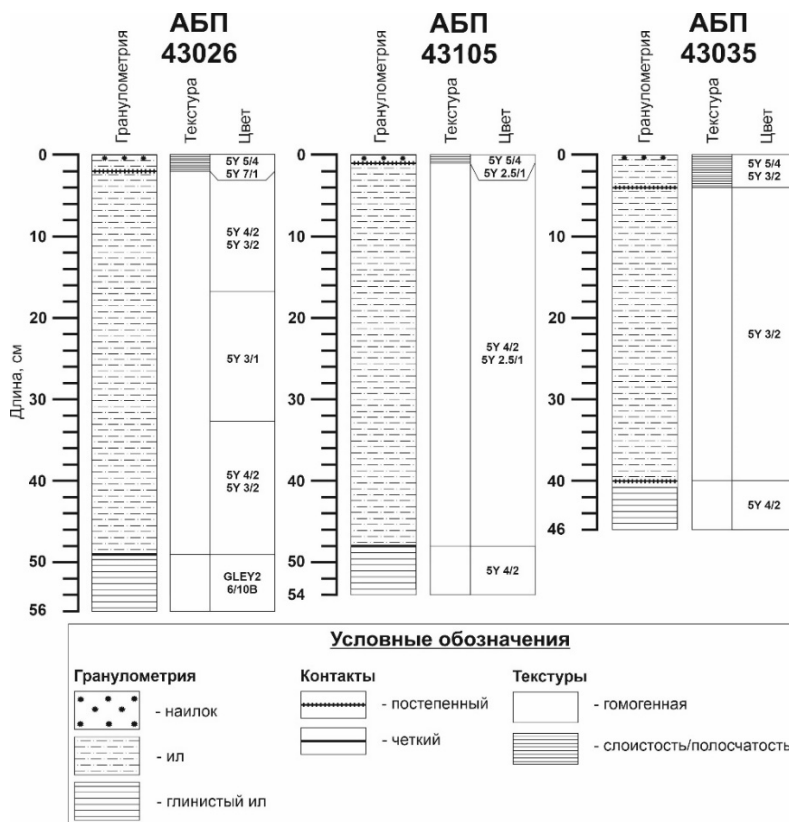
Литологическое описание

Осадки колонок можно разделить на три горизонта (слоя) в соответствии с изменением гранулометрического состава и текстуры отложений: верхний горизонт рыхлых, обводненных илистых осадков с отчетливо выраженной слоистостью, покрытых тонким (0,2–1 см) слоем хлопьеобразного наилка; промежуточный горизонт гомогенных илов; нижний горизонт уплотненных гомогенных илов, переходящих в илистые глины (рис. 2). Верхний горизонт осадков колонки АБП-43026 мощностью 2 см представлен тонкой слоистостью оливкового (5Y 5/4) и светло-серого (5Y 7/1) ила, нижняя граница слоя – постепенная. Поверхность осадков покрыта черным (5Y 2.5/1) наилком. Следы биотурбации отсутствуют. Нижележащий слой гомогенных осадков можно разделить на три интервала относительно изменения цвета осадков: 2–17 см – чередование ила оливково-серого (5Y 4/2) и темно-оливково-серого (5Y 3/2); 17–33 см – ил очень темный серый (5Y 3/1); 33–49 см – чередование ила оливково-серого (5Y 4/2) и темно-оливково-серого (5Y 3/2), нижняя граница слоя – четкая. В нижней части разреза вскрыт слой серо-голубых (GLEY 2 6/10B) глинистых илов мощностью 7 см (49–56 см).

В верхнем слое осадков колонки АБП-43035 отмечена рыхлая слоистость ила оливкового (5Y 5/4) и темно-оливково-серого (5Y 3/2) мощностью 4 см, нижняя граница – нечеткая (размытая). На поверхности слоя виден наилочек черный (5Y 2.5/1). Далее по разрезу (4–40 см) вскрыты темно-оливково-серые (5Y 3/2) гомогенные илы, менее обводненные и, соответственно, более плотные, чем в вышележащем слое. Нижний слой осадков (40–46 см) сложен глинистым илом оливково-серым (5Y 4/2), граница слоя – постепенная.

Верхний сантиметр осадков колонки АБП-43105 сильно обводнен и представлен микрослоистостью наилочка рыхлого оливкового (5Y 5/4) и черного ила (5Y 2.5/1). Нижняя граница слоя – постепенная. В нижележащем слое (1–48 см) гомогенных осадков наблюдается плавный переход вниз по разрезу от оливково-серого (5Y 4/2) ила к черному (5Y 2.5/1), нижняя граница слоя – четкая. Нижний горизонт осадков мощностью 6 см (48–54 см) представлен сильно уплотненным оливково-

серым (5Y 4/2) глинистым илом. В колонках АБП-43035 и АБП-43105 в верхних слоистых горизонтах наблюдаются следы умеренной биотурбации. В составе донных отложений колонок преобладают пелитовая и алевритовая фракции с содержанием песка (> 63 мкм) менее 5 %.



75

Рис. 2. Литологический состав изученных осадочных колонок.

Цвета обозначены следующими кодами в соответствии с цветовой шкалой Munsell Soil Color Chart: 5Y 2.5/1 – черный, 5Y 3/1 – очень темный серый, 5Y 3/2 – темно-оливково-серый, 5Y 4/2 – оливково-серый, 5Y 5/4 – оливковый, 5Y 7/1 – светло-серый, GLEY 2 6/10B – серо-голубой

Потери при прокаливании

В уплотненных осадках нижнего горизонта (56–49 см) колонки АБП-43026 значения ППП изменяются в пределах 7,1–10,2 % (рис. 3). В вышележащем слое илистых осадков (49–7 см) величина ППП колеблется от 9,4 до 24,1 %. В данном слое наблюдается постепенное повышение значений ППП от 9,2 % до 22,2 % в интервале 49–33 см. В интервале 33–29 см отмечается относительно небольшое понижение значений до 18,7 %, которое затем сменяется ростом показателя ППП до 22,8 % (на 23 см). Далее по разрезу (23–17 см) наблюдаются повышенные значения рассматриваемого показателя (22,8–24,2 %). Выше 17 см значения ППП изменяются скачкообразно от 18,9 до 22,8 % с уменьшением амплитуды колебаний вверх по разрезу.

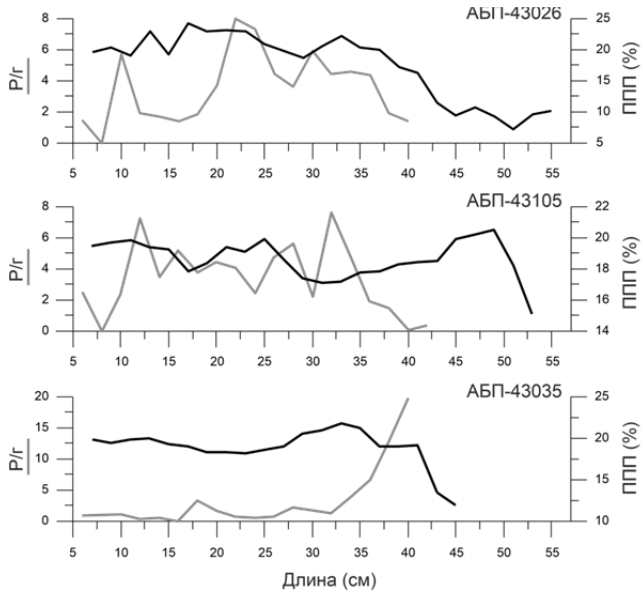


Рис. 3. Распределение концентрации бентосных фораминифер (P/r) и величины потерь при прокаливании (ППП, %) в изученных седиментационных колонках

В глинистых илах колонки АБП-43035 (46–41 см) значения ППП понижены (11,9–19,1%). В горизонте илистых осадков (41–7 см) значения ППП изменяются в пределах 18,2–21,8%. В интервале 35–29 см отмечены относительно высокие значения ППП (20,5–21,8%). Выше по разрезу происходит постепенное понижение показателя ППП до значений 18,2–18,4% на отрезке 23–19 см. Далее значения ППП плавно повышаются и в интервале 13–7 см наблюдаются относительно высокие значения (19,4–19,9%).

Нижний горизонт осадков (54–49 см) колонки АБП-43105 характеризуется пониженными значениями ППП – 15,1–20,6%. В вышележащем горизонте илистых осадков (49–7 см) показатели ППП изменяются от 17,1 до 20,6%. В нижней части горизонта (49–45 см) значения ППП достигают 19,9–20,6%, после чего плавно снижаются до 17,1–17,4% в интервале 33–29 см. Выше по осадочному разрезу значения ППП увеличиваются до 19,1–19,9% на отрезке 25–21 см. В интервале 19–17 см значения ППП понижены (17,8–18,3%), после чего значения возрастают до 19,3% на 15 см и остаются в пределах 19,4–19,8% выше по разрезу.

Микропалеонтологический анализ

Во всех изученных колонках найденные карбонатные БФ относились к двум видам рода *Elphidium* – *E. excavatum* и *E. incertum*. Поскольку оба эти вида указывают на повышение солености придонных вод до 12 епс и более, при изложении и обсуждении результатов они были объединены. Кроме того, при подсчете внутренних органических оболочек возможно определить только род растворившейся раковины.



В осадках колонки АБП-43026 значения концентраций раковин находились в пределах 0–8 P/г. Повышенные концентрации раковин наблюдались в интервалах 36–30 см (4,3–6 P/г), 26–22 см (4,4–8 P/г), а также на глубине 10 см (5,6 P/г). Содержание БФ в колонке АБП-43035 повышено относительно исследуемых колонок – 0–19,8 P/г. Максимальное значение (19,8 P/г) зафиксировано на глубине 40 см, после чего концентрации плавно уменьшались до значения 1,4 P/г (32 см). Выше по разрезу содержание раковин БФ в осадках оставалось низким за исключением единичного пика (3/3 P/г) на 18 см. В седиментационной колонке АБП-43105 концентрации раковин БФ варьировались в пределах 0–7,7 P/г. Интервалы, характеризующиеся повышенным содержанием раковин, находились на глубинах 34–32 см и 28–26 см (4,7–7,7 P/г и 4,7–5,6 P/г соответственно). На отрезке 24–12 см концентрации раковин в осадке скачкообразно росли от 2,4 до 7,2 P/г, после чего наблюдалось резкое снижение содержания БФ на горизонте 12–4 см (0–2,5 P/г).

Обсуждение

Возрастная модель для седиментационных разрезов была построена на основе подробного литологического описания, а также корреляции распределения ППП в осадках с опубликованными данными изучения колонок, отобранных в Балтийском море: 370531 и 303600 [19, р. 871–874]; М86-1а/36, М86-1а/37 и 370540 [16, р. 111–128]; М86-1/24/3 [4, р. 297–310]. Такой метод построения возрастной модели осадочных колонок используется для осадков Балтийского моря, обедненных карбонатными фораминиферами, например [31, р. 189–194]. Основываясь на корреляции опубликованных данных с полученными результатами по трем разрезам АБП-43026, АБП-43035 и АБП-43105, можно сделать вывод: осадки исследуемых колонок накопились в течение последних трех тысячелетий. Временные рамки для обсуждаемых климатических событий голоцена были взяты в соответствии с литературными источниками [4, р. 301; 18, р. 1184–1185; 19, р. 871]. При упоминании возраста событий использована система летоисчисления до настоящего времени; 1950 г. принят как год начала отсчета. Так, в исследуемом временном промежутке могут быть выделены следующие периоды: Римский теплый период (РТП) 2250–1550 л. н.; Темные века (ТВ) 1550–1150 л. н.; Средневековый климатический оптимум (СКО) 1000–600 л. н.; Малый ледниковый период (МЛП) 600–100 л. н.; Современный период потепления (СП) 100 л. н. – по н. в.

На основе комплексного анализа донных отложений реконструированы палеоэкологические условия в Гданьском бассейне. Установлено, что нижние горизонты уплотненных гомогенных осадков колонок накопились во время, предшествующее РТП. Отсутствие слоистости указывает на улучшение вентиляции придонного слоя воды, обусловленное затоками обогащенных кислородом вод. В Борнхольмском бассейне в данный период зафиксирован рост содержания раковин БФ в осадках, а также створок остракод, что было объяснено как повышение



солености вод [4, р. 303–308]. Пониженные значения ППП в данном слое осадков свидетельствуют о накоплении меньшего количества органического вещества (ОВ) в осадке ввиду уменьшения продуктивности поверхностных вод, вызванного похолоданием климата [4, р. 303–308; 16, р. 120–126]. Вентиляция придонного слоя затоковыми водами могла являться дополнительным фактором, снижающим концентрации накапливаемого ОВ из-за его окисления.

Следующие выше по разрезу интервалы (до 31 см – АБП-43026; до 29 см – АБП-43035; до 43 см – АБП-43105), обогащенные ОВ, соответствуют РТП. Увеличение значений ППП в осадочной колонке указывает на повышенную продуктивность поверхностных вод, обусловленную региональным потеплением климата [16, р. 120–126]. Ухудшение вентиляции придонных вод в течение соответствующих интервалов могло быть дополнительным фактором, способствовавшим накоплению органического вещества в осадках. Однако в колонках АБП-43026 и АБП-43035 на горизонтах 46–41 см и 39–37 см соответственно значения ППП существенно понижены. В то же время в данном интервале в колонке АБП-43035 наблюдаются высокие концентрации карбонатных БФ. В колонке АБП-43026 содержание раковин фораминифер постепенно повышается в течение всего РТП, однако остается значительно пониженным в сравнении с показателями на станции АБП-43035. Присутствие раковин рода *Criboelphidium* (*Elphidium*) указывает на то, что соленость придонных вод в соответствующее время в районе исследования составляла не менее 12 епс [4, р. 303–308; 6, р. 137–152]. Разницу в концентрации БФ можно объяснить большей глубиной в районе станции АБП-43035, что способствует аккумуляции затоковых вод. В работе [4, р. 303–308] также отмечен рост количества затоков в течение РТП, отраженный в увеличении количества раковин в осадках. Преимущественно положительная фаза североатлантического колебания (САК) во время РТП способствовала преобладанию западных ветров в районе Балтийского моря и интенсификации затоков североморских вод. Таким образом, низкие концентрации ОВ на начальной стадии РТП являются следствием окисления органики частыми затоками обогащенных кислородом вод. Однако на протяжении последующего этапа РТП объема затоковых вод было недостаточно для окисления возрастающего количества поступающей на дно органики в условиях потепления климата.

Вышележащие интервалы осадков, обедненные органическим веществом (31–25 см – АБП-3026; 27–17 см – АБП-43035; 43–27 см – АБП-43105) накоплены во время Темных веков. Похолодание климата во время ТВ может служить объяснением уменьшения количества ОВ в осадках из-за снижения поверхностной продуктивности. Накопление гомогенных (биотурбированных) осадков является результатом присутствия кислорода в придонных водах, поскольку он меньше расходовался на окисление ОВ [4, р. 303–308; 16, р. 120–126; 19, р. 871–873]. Вентиляция придонного слоя затоковыми водами могла также способствовать снижению концентрации накапливаемого ОВ ввиду его окисления в начале ТВ. В начале периода ТВ в колонках из Гданьской впа-



дины наблюдается рост концентрации раковин в пробах, указывающий на повышенную соленость придонных вод. Период ТВ приходится на положительную фазу САК [27, р. 1422–1429], обуславливающую интенсификацию западных ветров и придонного водообмена. В работе [4, р. 305–308], выполненной для Борнхольмского бассейна, реконструированы частые затоки североморских вод в ТВ на основе изучения БФ. Содержание органического вещества в осадках повышается при переходе от ТВ к СКО, одновременно возрастает концентрация БФ в осадках. Таким образом, накоплению органики в данный период способствует постепенное потепление климата.

Следующие выше по разрезу осадки (25–16 см – АБП-3026; 17–11 см – АБП-43035; 27–21 см – АБП-43105) сформированы во время СКО. Относительно высокие значения ППП в данных интервалах отражают повышенную продуктивность поверхностных вод, обусловленную региональным потеплением климата [16, р. 120–126; 19, р. 871–873]. В работах, посвященных реконструкции условий среды в Готландской впадине [16, р. 120–126; 19, р. 871–873], отмечается накопление слоистых, богатых органикой осадков, указывающих на более высокие температуры поверхностных вод, а также гипоксию в придонном слое. Высокие концентрации БФ в осадках колонки, отобранной на Гданьско-Готландском пороге (АБП-43026), свидетельствуют о том, что соленость придонных вод в соответствующее время в районе исследования была повышена ввиду затоков. По данным микропалеонтологического исследования [4, р. 305–308], выполненного для Борнхольмской впадины, СКО характеризуется наиболее выраженным увеличением содержания БФ в осадках, обусловленным интенсификацией придонного водообмена между Балтийским и Северным морями. Позитивная фаза САК во время СКО [27, р. 1422–1429; 29, р. 78–80] повлияла на преобладание западных ветров в исследуемом регионе, которые, в свою очередь, привели к более частым затокам соленых вод в Балтийское море. Однако в осадках Гданьской впадины (АБП-43035 и АБП-43105) содержание раковин БФ относительно низкое, что может являться следствием гипоксии в придонном слое, вызванной поступлением большого количества ОВ на дно.

Вышележащие интервалы осадков (16–11 см – АБП-3026; 11–6 см – АБП-43035; 21–12 см – АБП-43105) накоплены во время Малого ледникового периода. Похолодание климата во время МЛП, вызвавшее снижение температуры воды в поверхностном слое Балтийского моря на 2°С [19, р. 872–874], привело к снижению продуктивности поверхностных вод и, следовательно, уменьшению потока ОВ на дно. Относительно низкое содержание раковин БФ в осадках, соответствующих МЛП, указывает на снижение частоты затоков, что также было отмечено в работах, выполненных для других районов моря [4, р. 305–308; 16, р. 120–126; 20, р. 63–66]. Смена фазы североатлантического колебания с позитивной на негативную при переходе от СКО к МЛП повлияла на уменьшение доли западных ветров, что привело к ослаблению водообмена между Северным и Балтийским морями [4, р. 305–308; 29, р. 78–80].



Выше по седиментационным разрезам осадки МЛП сменяются обогащенными органическим веществом осадками, накопленными во время Современного периода потепления. Слоистость осадков в самых верхних интервалах разрезов говорит об усилении гипоксии придонного слоя вод ввиду усиливающегося потепления климата, а также негативного антропогенного влияния, вызывающего развитие эвтрофикации. При переходе от МЛП к СП наблюдается пик увеличения содержания БФ в осадках, однако затем концентрации БФ резко падают и остаются низкими на протяжении всего периода СП. Такое распределение БФ говорит об ухудшении водообмена в глубоких слоях, отмеченном также в исследованиях, проведенных в Борнхольмском и Готландском бассейнах [4, р. 305–308; 16, р. 120–126]. Близкие к нулю концентрации раковин в осадках указывают на то, что при потеплении климата и увеличении потока ОВ на дно дефицит кислорода может стать ведущим лимитирующим фактором для развития сообществ БФ. Данный фактор необходимо учитывать при проведении реконструкции условий среды Балтийского моря на основе микропалеонтологических данных.

Заключение

В результате комплексного анализа коротких седиментационных колонок, отобранных в Гданьской впадине, восстановлены палеоокеанологические условия среды в течение последних 1,5 тыс. лет. Несмотря на плохую сохранность карбонатных фораминифер в осадках Балтийского моря, совместный подсчет раковин и внутренних органических оболочек БФ позволил использовать данные микропалеонтологического анализа для изучения динамики затоков североморских вод. В исследованных осадках преобладали виды рода *Elphidium*, присутствие которых свидетельствует о солёности придонных вод не менее 12 епс [4, р. 303–308; 6, р. 137–152].

Повышенное содержание раковин БФ в колонках донных осадков указывает на усиление водообмена между Балтийским и Северным морями во время, предшествующее Римскому теплему периоду, во время самого РТП, Темных веков и Средневекового климатического оптимума. Усиление активности затоков было вызвано положительной фазой североатлантического колебания и, следовательно, преобладанием сильных западных ветров.

Высокие значения потерь при прокаливании являются индикатором увеличения продуктивности поверхностных вод, которое обусловлено потеплением климата во время РТП, СКО и СП. Наличие гипоксических условий в эти периоды способствовало накоплению органического вещества в осадках. В пределах данных временных интервалов частота и объем затоков обогащенных кислородом североморских вод оказывались недостаточными для полного насыщения кислородом придонных горизонтов. Накопление слоистых осадков без следов биотурбации в верхних сантиметрах разрезов указывает на усиление гипоксии придонных вод ввиду современного потепления климата, а также негативного антропогенного влияния, усиливающего эвтрофикацию.



Экспедиционные исследования проведены в рамках госзадания ИО РАН (тема №0149-2019-0013). Комплексный анализ донных отложений и интерпретация данных выполнены за счет гранта РФФИ №19-45-393008 р_мол_а («Реконструкция параметров палеоэкологических обстановок в Балтийском море, обусловленных вариациями поступления североморских вод, в позднем голоцене»).

Список литературы

1. Система Балтийского моря / отв. ред. А. П. Лисицын. М., 2017.
2. Саидова Х. М. Биоценозы современных бентосных фораминифер, стратиграфия и палеогеография голоцена Балтийского моря по фораминиферам // Осадкообразование в Балтийском море. М., 1981.
3. Andren E., Andren T., Sohlenius G. The Holocene history of the southwestern Baltic Sea as reflected in a sediment core from the Bornholm Basin // *Boreas*. 2000. Vol. 29, №3. P. 233–250.
4. Binczewska A., Moros M., Polovodova-Asteman I. et al. Changes in the inflow of saline water into the Bornholm Basin (SW Baltic Sea) during the past 7100 years – evidence from benthic foraminifera record // *Boreas*. 2017. Vol. 47, №1. P. 297–310.
5. Boonstra M., Ramos M.I.F., Lammertsma E.I. et al. Marine connections of Amazonia: Evidence from foraminifera and dinoflagellate cysts (early to middle Miocene, Colombia/Peru) // *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*. 2015. Vol. 417. P. 176–194.
6. Brodniewicz I. Recent and some Holocene Foraminifera of the southern Baltic Sea // *Acta Palaeontologica Polonica*. 1965. Vol. 10, №2. P. 131–260.
7. Carstensen J., Conley D.J., Bonsdorff E. et al. Hypoxia in the Baltic Sea: biogeochemical cycles, benthic fauna, and management // *Ambio*. 2014. Vol. 43, №1. P. 26–36.
8. Concheyro A., Carames A., Amenabar C.R. et al. Nannofossils, foraminifera and microforaminiferal linings in the Cenozoic diamictites of Cape Lamb, Vega Island, Antarctica // *Polish Polar Research*. 2014. Vol. 35, №1. P. 1–26.
9. Emeis K.C., Struck U., Blanz T. et al. Salinity changes in the central Baltic Sea (NW Europe) over the last 10 000 years // *The Holocene*. 2003. Vol. 13, №3. P. 411–421.
10. Emelyanov E. M. Geology of the Gdansk Basin, Baltic Sea. Kaliningrad, 2002.
11. Emelyanov E. M., Lukashina N. P. Stratigraphy. Geology of the Bornholm Basin // *Aarhus Geoscience*. 1995. Vol. 5. P. 37–41.
12. Grigoriev A., Zhamoida V., Spiridonov M. et al. Late-glacial and Holocene palaeoenvironments in the Baltic Sea based on a sedimentary record from the Gdansk Basin // *Climate Research*. 2011. Vol. 48, №1. P. 13–21.
13. Harff J., Björck S., Hoth P. The Baltic Sea Basin: Introduction // *The Baltic Sea Basin*. 2011. Vol. 449. P. 3–9.
14. Hermelin J.O.R. Distribution of Holocene benthic foraminifera in the Baltic Sea // *The Journal of Foraminiferal Research*. 1987. Vol. 17, №1. P. 62–73.
15. Hänninen J., Vuorinen I., Hjelt P. Climatic factors in the Atlantic control the oceanographic and ecological changes in the Baltic Sea // *Limnology and Oceanography*. 2000. Vol. 45, №3. P. 703–710.
16. Häusler K., Moros M., Wacker L. et al. Mid- to late Holocene environmental separation of the northern and central Baltic Sea basins in response to differential land uplift // *Boreas*. 2017. Vol. 46, №1. P. 111–128.
17. Jensen J.B., Moros M., Endler R. et al. The Bornholm Basin, southern Scandinavia: a complex history from Late Cretaceous structural developments to recent sedimentation // *Boreas*. 2017. Vol. 46, №1. P. 3–17.
18. Jilbert T., Slomp C.P. Rapid high-amplitude variability in Baltic Sea hypoxia during the Holocene // *Geology*. 2013. Vol. 41, №11. P. 1183–1186.



19. Kabel K., Moros M., Porsche C. et al. Impact of climate change on the Baltic. Sea ecosystem over the past 1000 years // *Nature Climate Change*. 2012. Vol. 2, №12. P. 871–874.
20. Kotilainen A.T., Arppe L., Dobosz S. et al. Echoes from the past: A healthy Baltic Sea requires more effort // *Ambio*. 2014. Vol. 43, №1. P. 60–68.
21. Leipe T., Tauber F., Vallius H. et al. Particulate organic carbon (POC) in surface sediments of the Baltic Sea // *Geo-Marine Letters*. 2011. Vol. 31, №3. P. 175–188.
22. Lukashina N.P. Foraminifers as indicators of water masses in the Baltic Sea and in the Kattegat Strait // *Oceanology*. 1995. Vol. 35, №2. P. 282–288.
23. Lutze G. Zur Foraminiferen-Fauna der Ostsee // *Meyniana*. 1965. Vol. 15. P. 75–142.
24. Matthäus W. The history of investigation of salt water inflows into the Baltic Sea – from the early beginning to recent results // *Marine Science Report*. 2006. Vol. 65.
25. Mohrholz V., Naumann M., Nausch G. et al. Fresh oxygen for the Baltic Sea – An exceptional saline inflow after a decade of stagnation // *Journal of Marine Systems*. 2015. Vol. 148. P. 152–166.
26. Ning W., Andersson P.S., Ghosh A. et al. Quantitative salinity reconstructions of the Baltic Sea during the mid-Holocene // *Boreas*. 2017. Vol. 46, №1. P. 100–110.
27. Schimanke S., Meier H.E.M., Kjellstrom E. et al. The climate in the Baltic Sea region during the last millennium simulated with a regional climate model // *Climate of the Past Discussions*. 2012. Vol. 8, №2. P. 1419–1433.
28. Schönfeld J., Alove E., Geslin E. et al. The FOBIMO (FOraminiferal Bio-Monitoring) initiative – Towards a standardised protocol for soft-bottom benthic foraminiferal monitoring studies // *Marine Micropaleontology*. 2012. Vol. 94. P. 1–13.
29. Trouet V., Esper J., Graham N.E. et al. Persistent positive North Atlantic oscillation mode dominated the Medieval Climate Anomaly // *Science*. 2009. Vol. 324. P. 78–80.
30. Voipio A. (ed.) *The Baltic Sea*. Elsevier, 1981.
31. Warden L., Moros M., Neumann T. et al. Climate induced human demographic and cultural change in northern Europe during the mid-Holocene // *Scientific Reports*. 2017. Vol. 7, №1. P. 1–11.
32. Winterhalter B.O. Late-Quaternary stratigraphy of Baltic Sea basins – a review // *Bulletin of the Geological Society of Finland*. 1992. Vol. 64, №2. P. 189–194.
33. Witkowski A. Recent and fossil diatom flora of the Gulf of Gdansk, Southern Baltic Sea. Origin, composition and changes of diatom assemblages during the Holocene // *Bibliotheca Diatomologica*. 1994.

Об авторах

Екатерина Петровна Пономаренко – мл. науч. сотр., Институт океанологии им. П.П. Ширшова РАН, Россия.

E-mail: ponomarenko.katharina@gmail.com

Любовь Александровна Кулешова – мл. науч. сотр., Институт океанологии им. П.П. Ширшова РАН, Россия.

E-mail: lubov_kuleshova@mail.ru

The authors

Ekaterina P. Ponomarenko, Junior Research Fellow, Shirshov Institute of Oceanology, Russian Academy of Sciences, Russia.

E-mail: ponomarenko.katharina@gmail.com

Liubov A. Kuleshova, Junior Research Fellow, Shirshov Institute of Oceanology, Russian Academy of Sciences, Russia.

E-mail: lubov_kuleshova@mail.ru