

*На правах рукописи*  
УДК: 551.89 + 551.794

**ПОНОМАРЕНКО Екатерина Петровна**

**УСЛОВИЯ И ОСОБЕННОСТИ ФОРМИРОВАНИЯ ДОННЫХ  
ОТЛОЖЕНИЙ ЮЖНОЙ И ЦЕНТРАЛЬНОЙ ЧАСТЕЙ БАЛТИЙСКОГО  
МОРЯ В СРЕДНЕМ И ПОЗДНЕМ ГОЛОЦЕНЕ**

1.6.14 Геоморфология и палеогеография

**АВТОРЕФЕРАТ**

диссертации на соискание ученой степени  
кандидата географических наук

Санкт-Петербург  
2025

Диссертационное исследование выполнено в научно-образовательном центре «Геоэкология и морское природопользование» федерального государственного автономного образовательного учреждения высшего образования «Балтийский федеральный университет имени Иммануила Канта»

**Научный руководитель** кандидат геолого-минералогических наук,  
директор научно-образовательного центра «Геоэкология и морское природопользование» федерального государственного автономного образовательного учреждения высшего образования «Балтийский федеральный университет имени Иммануила Канта»  
**Баширова Лейла Джангировна**

**Официальные оппоненты**

- **Полякова Елена Ивановна**, доктор географических наук, доцент, ведущий научный сотрудник Научно-исследовательской лаборатории новейших отложений и палеогеографии плейстоцена федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова»
- **Лудикова Анна Валерьевна**, кандидат географических наук, старший научный сотрудник Лаборатории географии и гидрологии Института Озероведения РАН – обособленного структурного подразделения Федерального государственного бюджетного учреждения науки «Санкт-Петербургский исследовательский центр Российской академии наук»

**Ведущая организация** Федеральное государственное бюджетное учреждение науки  
**«Институт географии Российской академии наук»**

Защита диссертации состоится 25 апреля 2025 г. в 11.00 на заседании совета 33.2.018.02 по защите диссертаций на соискание ученой степени кандидата наук, на соискание ученой степени доктора наук на базе Российского государственного педагогического университета им. А. И. Герцена по адресу 191186, Санкт-Петербург, набережная реки Мойки, 48, корп. 12, ауд. 21

С диссертацией можно ознакомиться в фундаментальной библиотеке Российского государственного педагогического университета им. А. И. Герцена по адресу 191186, Санкт-Петербург, набережная реки Мойки, 48, корп. 5 и на сайте университета по адресу [http://dissertation.spb.ru/Preview/Karta/karta\\_000001087.html](http://dissertation.spb.ru/Preview/Karta/karta_000001087.html)

Автореферат разослан \_\_\_\_\_ 2025 г.

Учёный секретарь  
диссертационного совета  
кандидат географических наук, доцент

Сазонова Ирина Евгеньевна

## ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

### Актуальность темы исследования

Балтийское море — полузамкнутый солоноватоводный водоем с устойчивой стратификацией (Voiron, 1981). Ключевое воздействие на среду осадконакопления бассейна оказало возобновление водообмена с Северным морем и Атлантическим океаном через Датские проливы при смене стадии Анцилового озера стадией Литоринового моря около 8000–7500 лет назад (Jensen et al., 1999; Andren et al., 2011). Режим водообмена формируется, прежде всего, под влиянием атмосферной циркуляции над Северной Атлантикой (Hänninen et al., 2000; Olsen, 2012). В первую очередь это изменения параметров центров действия атмосферы, характеризующихся собственной цикличностью, а также подверженных влиянию изменений глобальной атмосферной циркуляции (Olsen et al., 2012; Schimanke et al., 2012). Так, положительная фаза североатлантического колебания (САК) обуславливает западные ветры, способствующие поступлению соленых вод Северного моря в глубоководные впадины Балтийского (т.н. затоки североморских вод), и более мягкие зимы в Балтийском регионе (Matthaus and Schinke, 1994, 1998; Hurrell 1995; Alheit and Hagen, 1997; Olsen et al., 2012; Meier et al., 2023). Согласно палеоокеанологическим реконструкциям, в целом, хорошо прослеживается положительная корреляция между соленостью придонных вод и САК, однако данные работы немногочисленны и характеризуются низкими пространственным и временным разрешениями (например, Harff et al., 2011; Vinczewska et al., 2018; Andrén et al., 2020). В исследованиях, основанных на результатах статистического анализа и моделирования гидрометеорологических данных, единое мнение относительно влияния САК на придонный водообмен (Zorita and Laine, 2000; Meier and Kauker, 2003; Meier, 2005; Meier, 2007), а также наблюдаемой динамики частоты затоков (Brunnabend et al., 2018; Mohrholz, 2018) отсутствует. Климатические изменения и сопутствующая трансформация атмосферной циркуляции оказывают влияние на периодичность и интенсивность затоков и, следовательно, среду осадконакопления в Балтийском море как в прошлом, так и в будущем (HELCOM, 2007; Conley et al., 2009; Kabel et al., 2012; Jilbert & Slomp 2013, Carstensen et al., 2014; Mohrholz, 2018). Для понимания наблюдаемой динамики и оценки ее воздействия на изменение природных условий, составления надежных прогнозов, корректировки и валидации существующих климатических моделей необходимы длинные непрерывные ряды данных об изменении параметров среды. Долгопериодные вариации палеогеографических, палеоклиматических и палеоокеанологических обстановок находят отражение в характеристиках осадочных разрезов Балтийского моря, которые, ввиду высоких скоростей осадконакопления, представляют детальные и непрерывные архивы данных. Палеогеографические реконструкции высокодинамичных систем, таких как Балтийское море, требуют комплексного междисциплинарного подхода, включающего литологические, геохимические и микропалеонтологические исследования, а также привлечение архивных и модельных океанологических и метеорологических данных. Микропалеонтологический анализ играет важную роль в реконструкции условий осадконакопления. Однако для определения надежных индикаторов изменения палеогеографических условий и достоверной интерпретации результатов необходима информация о региональных особенностях распределения сообществ фораминифер и отражении в них палеоокеанологических и палеоклиматических сигналов.

**Объект исследования** – донные осадки Балтийского моря

**Предмет исследования** – динамика природных условий и изменение среды осадконакопления в Балтийском море в голоцене.

**Цель** настоящей работы – восстановить условия осадконакопления в южной части Балтийского моря с акцентом на влияние затоков североморских вод в голоцене в контексте изменения атмосферной циркуляции.

Для достижения поставленной цели были выполнены следующие **задачи**:

- 1 Изучить литологические и геохимические свойства донных осадков южной и центральной частей Балтийского моря.
- 2 Построить возрастные модели осадочных разрезов на основе данных абсолютного (AMS  $^{14}\text{C}$ ) и относительного датирования осадков.
- 3 Изучить условия осадконакопления в течение 5 лет на основе анализа архива гидрологических и гидрохимических данных.
- 4 Провести количественный и качественный анализ распределения бентосных фораминифер в поверхностных донных осадках и седиментационных колонках.
- 5 По результатам комплексного анализа поверхностных донных осадков и характеристик придонных вод выявить особенности распространения бентосных фораминифер, которые могут быть положены в основу палеореконструкций.
- 6 Выполнить реконструкцию условий осадконакопления в южной части Балтийского моря, а также палеоклиматической изменчивости в позднем голоцене.

### **Научная новизна**

В рамках диссертационной работы впервые:

- проведены комплексные исследования, включающие микропалеонтологический анализ коротких осадочных разрезов с ненарушенным верхним слоем осадков, отобранных в Арконском, Борнхольмском, Гданьском и Готландском бассейнах Балтийского моря;
- подробно описан родовой состав современных бентосных фораминифер, обнаруженных в российском секторе юго-восточной части Балтийского моря, впервые получены фотографии раковин высокого разрешения (электронный сканирующий микроскоп) и собрана микропалеонтологическая коллекция;
- изучено количественное и качественное распространение бентосных фораминифер в российском секторе юго-восточной части Балтийского моря в зависимости от характеристик донных осадков (гранулометрический состав и содержание органического углерода в осадке) и придонных вод (температура, соленость и содержание растворенного кислорода);
- в сообществе бентосных фораминифер российского сектора юго-восточной части Балтийского моря выделены роды-индикаторы изменения условий осадконакопления, а также палеоокеанологических параметров, которые могут быть применены при палеореконструкции параметров среды;
- получены данные об особенностях осадконакопления и палеоокеанологических условиях (вариации биопродуктивности поверхностных вод, изменение содержания кислорода и солености придонных вод) на юго-западном склоне Восточного Готландского бассейна в среднем и позднем голоцене;
- доказана взаимосвязь между интенсивностью затоков североморских вод в Готландском бассейне и вариациями существующих модельных параметров североатлантического колебания в среднем и позднем голоцене;
- в трех бассейнах южной части Балтийского моря изучена пространственная неоднородность влияния затоков на осадконакопление и условия среды, обусловленная морфологией бассейна моря, а также изменением параметров САК в позднем голоцене.

## Теоретическая и практическая значимость работы

Результаты диссертационной работы вносят существенный вклад в изучение условий и особенностей осадконакопления Балтийского моря, обусловленных геоморфологией и гидрологией бассейна, на фоне климатических вариаций среднего и позднего голоцена. Выполненная корреляция результатов комплексного анализа осадочных колонок и данных моделирования североатлантического колебания имеет важное значение для понимания зависимости периодичности и интенсивности (относительного объема интрузий) затоков североморских вод от изменения атмосферной циркуляции в голоцене. Продолжительные непрерывные ряды данных об изменении палеогеографических и палеоокеанологических параметров, представленные в работе, необходимы для выявления природных взаимосвязей, управляющих процессами, а также понимания будущей динамики среды осадконакопления в условиях меняющегося климата и атмосферной циркуляции на длинных временных отрезках. Полученная в рамках настоящего исследования информация о распространении бентосных фораминифер в зависимости от вариаций палеоокеанологических условий (биопродуктивность поверхностных вод, содержание кислорода в придонных водах, соленость придонных вод) в дальнейшем может быть применена при реконструкции условий осадконакопления по данным других осадочных разрезов, отобранных в юго-восточной части Балтийского моря. Результаты диссертационного исследования могут быть использованы для корреляции с данными анализа других осадочных колонок с целью реконструкции пространственного изменения условий формирования осадков в Балтийском море. Результаты анализа исследуемых колонок могут быть сопоставлены с данными изучения осадочных разрезов прилегающего Балтийского региона для изучения динамики палеогеографических обстановок в голоцене. Построенные возрастные модели могут быть основой литостратиграфических корреляций. Данные комплексного анализа могут быть использованы при построении и валидации климатических моделей и прогнозов изменения природных условий. Подготовленная микропалеонтологическая коллекция и фотографии бентосных фораминифер, полученные с помощью электронного сканирующего микроскопа, могут быть использованы в учебном и научном процессах. Результаты работы используются в научных исследованиях АО ИО РАН.

### Положения, выносимые на защиту

1 Представители рода *Elphidium* (*Cribrøelphidium*) являются индикаторами изменений придонных условий осадконакопления в юго-восточной части Балтийского моря, связанных с частотой и объемом затоков североморских вод. Группы агглютинированных фораминифер являются вспомогательным индикатором придонной динамики и продуктивности вод.

2 Установлена взаимосвязь между интенсивностью затоков североморских вод и вариациями модельных параметров североатлантического колебания в среднем–позднем голоцене, которая подтверждается данными комплексного анализа осадочного разреза, отобранного в Готландском бассейне.

3 В течение последнего тысячелетия в южной части Балтийского моря влияние затоков на условия осадконакопления характеризуется пространственной неоднородностью, отражающей изменения параметров индекса североатлантического колебания.

## **Степень достоверности и апробация результатов**

Достоверность результатов обеспечена достаточным количеством и соответствующим качеством исследуемых материалов, а также комплексным изучением, включающим микропалеонтологический, литологический, геохимический, гидрохимический и статистический анализы. Отбор и подготовка проб, а также анализы проведены в соответствии со стандартными опубликованными методиками и требованиями. Основные положения диссертации изложены в 6 рецензируемых публикациях, в том числе в 5 изданиях, входящих в базы цитирования Scopus и Web of Science. Результаты исследования обсуждены на научно-практических семинарах лаборатории геологии Атлантики АО ИО РАН, проходивших в 2016-2024 годах, а также представлены на всероссийских и международных конференциях, таких как XXII и XXIV Международные научные конференции (Школы) по морской геологии (Москва 2017, 2021); II, IV, V, VI, VII Всероссийские конференции молодых ученых «Комплексные Исследования Мирового Океана» (Москва, 2017, Севастополь 2019, Калининград 2020, Москва 2021, Санкт-Петербург 2023); Генеральные ассамблеи Европейского союза Наук о Земле 2017 и 2019 годов (European Geosciences Union, Вена, Австрия); II Балтийская конференция – Балтийский регион в переходный период (2nd Baltic Earth Conference – The Baltic Sea Region in Transition, Хельсингер, Дания 2018); 14 Коллоквиум по геологии Балтийского моря (14th Colloquium on Baltic Sea Marine Geology, Стокгольм, Швеция 2018); Международный полевой симпозиум рабочей группы Перибалтик (International Field Symposium of the Peribaltic Working Group, Грайфсвальд, Германия 2019); VI Всероссийская научная конференция (с международным участием) «Динамика экосистем в голоцене» (Санкт-Петербург 2022), и опубликованы в соответствующих сборниках.

## **Личный вклад автора**

Автор лично участвовала в отборе материала поверхностных донных отложений, а также седиментационных колонок в 33-м рейсе НИС «Академик Страхов» (октябрь–декабрь 2016 года), в 43-м и 44-м рейсах НИС «Академик Борис Петров» (август и октябрь 2018 года соответственно). В лаборатории геологии Атлантики АО ИО РАН автором проведены: литологическое описание 7 осадочных колонок, отбор проб и пробоподготовка, количественный и качественный микропалеонтологический анализы поверхностных осадков, а также 7 исследуемых колонок, рентгенофлуоресцентный и гранулометрический анализы коротких колонок. Автор отбирала материал для проведения радиоуглеродного (AMS  $^{14}\text{C}$ ) датирования осадков и изучения распределения в них концентраций свинца, на основе которых автором самостоятельно были построены возрастные модели для 5 колонок. Интерпретация полученных результатов, сопоставления и выводы, изложенные в диссертационной работе, сделаны лично автором. Автор подготовила и представила результаты исследования на всероссийских и международных конференциях, а также успешно реализовала руководство грантом РФФИ № 19-45-393008 р\_мол\_а «Реконструкция параметров палеоэкологических обстановок в Балтийском море, обусловленных вариациями поступления североморских вод, в позднем голоцене».

## **Благодарности и источники финансирования работы**

Автор выражает благодарность своему научному руководителю к.г.-м.н. Лейле Джангировне Башировой за поддержку и всестороннюю помощь в работе над диссертационным исследованием, постоянное внимательное отношение к процессу работы над диссертацией. Автор благодарна к.г.-м.н. В.В. Сивкову и д.г.н. Дубравину В.Ф. за конструктивные

критические замечания. Автор признательна д.ф.-м.н., проф. В.А. Гриценко за разностороннюю помощь и поддержку. Помощь профессора Е. Нагги (Jeno Nagy) при определении видов бентосных фораминифер оказала ключевое влияние на развитие работы. Автор благодарит Дорохову Е.В. за проведение гранулометрического и рентгенофлуорисцентного анализов, а также обучение данным видам анализов; Кречика В.А. — за выполнение гидрологических работ и последующую статистическую обработку результатов, Пугачеву Т.Л. — за проведение гранулометрического, рентгенофлуорисцентного, микропалеонтологического и геохимического анализов; Жолинскую Е.П. и Лихину А.А. — за выполнение геохимических анализов. Большое спасибо участникам научных рейсов ПШ-131, АНС-33, АБП-43 и 44 за помощь в получении материала. За предоставление материально-технической базы для сбора и анализа материала автор благодарит АО ИО РАН, а также всех сотрудников института, причастных к сбору, обработке и анализу материалов и данных. Сочетание дружеской поддержки и профессиональной помощи Любови Кулешовой, Лилии Хатмуллиной и Марии Капустиной сыграло важную роль.

Исследования проведены при финансовой поддержке государственного задания АО ИО РАН по темам № 0149-2018-0012; № 0149-2019-0013 и № FMWE-2021-0012. Исследование поддержано грантом РФФИ № 19-45-393008 р\_мол\_а, программой повышения конкурентоспособности БФУ им. И. Канта «5-100», а также грантами Российского научного фонда № 18-77-10016, № 22-17-00170, <https://rscf.ru/project/22-17-00170/>.

## **ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ**

### **Глава 1. Осадконакопление Балтийского моря — взаимодействие геоморфологических и гидрологических процессов**

В первой главе рассмотрен вопрос истории формирования Балтийского моря, а также описаны основные черты геоморфологии бассейна в рамках трудов российских и зарубежных ученых (Гуделис и Емельянов, 1976; Voipio, 1981; Лисицын и Емельянов, 1981; Гуделис, 1985; Григялис, 1991; Winterhalter, 1992; Блажчишин, 1998; Harff et al., 2011; Andren et al., 2011; Rosentau et al., 2017). Балтийское море занимает западную и центральную части Балтийского осадочного бассейна, зародившегося в позднем эдиакаре — раннем кембрии, и, следовательно, тесно связано с его развитием. Основными факторами, повлиявшими на современную морфологию бассейна, являются доледниковая поверхность коренных пород, ледниковая эрозия и отложение, послеледниковые осадочные процессы. Морфология бассейна обуславливает чувствительность условий Балтийского моря к изостатическим движениям и глобальным изменениям уровня океана. Более подробно рассмотрена история Балтийского моря в поздне- и послеледниковое время, в течение которого оно прошло через четыре основных этапа: Балтийское ледниковое озеро, Иольдиевое море, Анциловое озеро и Литориновое море.

Чтобы определить актуальное направление развития диссертационной работы, проанализировано современное состояние исследований в данной области. В конце XIX столетия изучение геоморфологии и систематический отбор осадков Балтийского моря преследовали практические цели (Григялис, 1991). Более поздние подробные обширные описания геологии и геоморфологии Балтийского моря и его отдельных бассейнов опубликованы во многих работах (например, Гудялис и Емельянов, 1976; Лисицын и Емельянов, 1981; Voipio, 1981; Григялис, 1991; Winterhalter, 1992; Harff et al., 2011; Rosentau et al., 2017). Исследования истории развития Балтийского моря и эволюции осадконакопления в голоцене также довольно многочисленны (например, Кессел, 1965; Давыдова и др., 1970; Гудялис, 1985; Григялис, 1991; Блажчишин 1998; Andren et al., 2000; Andren et al., 2011).

Несмотря на решающее влияние водообмена с Северным морем на формирование осадков и природную среду Балтийского моря вопрос распространения затоков в геологическом прошлом исследован не полностью. Большинство подобных исследований основано на данных диатомового анализа, который позволяет реконструировать соленость поверхностного слоя воды в голоцене (например, Witkowski, 1994; Andren et al., 2000; Sohlenius et al., 2001; Emeis et al., 2003; Ning et al., 2017). Альтернативным методом является изучение элементного состава донных отложений (например, Grigoriev et al., 2011; Jilbert and Slomp, 2013; Carstensen et al., 2014; Lenz et al., 2015; Moros et al., 2017, Riabchuk et al., 2021). Среди опубликованных работ немногие (Brodniewicz, 1965; Lutze, 1965; Саидова, 1981; Лукашина, 1995, 1997, 2006; Emelyanov and Lukashina, 1995; Kotilainen et al., 2014; Binczewska et al., 2017; Hausler et al., 2017; Groeneveld et al., 2018; van Wirdum et al., 2019; KostECKI et al., 2021) рассмотрели изменения придонной солености в Балтийском море в голоцене по данным изучения фораминифер в осадочных колонках. Такое малое число палеогеографических работ можно объяснить плохой сохранностью карбонатных микрофоссилий, а также высокой трудоемкостью анализа ввиду малого размера и количества раковин. Основная масса микропалеонтологических исследований сконцентрирована на изучении современных бентосных фораминифер. В российском секторе юго-восточной части Балтийского моря данные о распределении бентосных фораминифер в поверхностном слое донных осадков опубликованы в единичных работах отечественных исследователей (Саидова, 1981, 1982; Лукашина, 1995). Также мало изучено распределение бентосных фораминифер на разных временных масштабах — в осадочных разрезах, отобранных в данном районе (например, Саидова 1981; Emelyanov and Lukashina, 1995; Лукашина 2006).

## Глава 2. Материал и методы исследования

Во второй главе представлены материалы исследования и методы, которыми они были изучены. Диссертационная работа основана на изучении 26 проб поверхностных донных отложений, отобранных на 21 станции в российском секторе юго-восточной части Балтийского моря и Борнхольмском бассейне, а также 7 седиментационных колонок, отобранных на 6 станциях в Гданьском, Готландском, Борнхольмском и Арконском бассейнах Балтийского моря (рис. 1). Расположение изученных осадочных колонок в пяти бассейнах Балтийского моря позволяет изучить не только временные, но и пространственные вариации условий формирования донных осадков в Балтийском море в течение голоцена. Методологическая основа исследования включает следующие анализы осадков: литологический, качественный и количественный микропалеонтологический (249 проб, сухая и влажная фракции более 63 мкм), гранулометрический (147 проб), геохимический (369 проб), определение элементного состава 691 пробы методом рентгенофлуорисцентного анализа. Величина потерь при прокаливании (ППП) и концентрация органического углерода использованы в качестве показателей содержания органического вещества (ОВ) в осадках. Соотношение Si/Ti применено как индикатор продукции диатомовых водорослей, Zr/Rb — интенсивности придонных течений, Mn/Fe и Mn/Ti — изменения окислительно-восстановительных условий. Для исследования влияния гидрологических и гидрохимических параметров на распространение бентосных фораминифер в российском секторе юго-восточной части Балтийского моря проведен статистический анализ пятилетнего архива гидрологических данных АО ИО РАН (содержание растворенного кислорода, соленость и температура придонных вод). Полученный автором фактический материал обработан с применением программ Microsoft Excel, Quantum GIS, CALIB 14C Calibration Program, Clam version 4.0.4. Хронология осадочных разрезов основана на результатах радиоуглеродного датирования 13 образцов методом ускорительной масс-спектрометрии, а также на данных распределения концентраций свинца вдоль разрезов.



Теоретической основой исследования послужили труды отечественных и зарубежных авторов по седиментологии, геологии, микропалеонтологии, геохимии, палеогеографии, палеоокеанологии, палеоклиматологии, метеорологии и гидрологии Балтийского моря и региона Северной Атлантики.

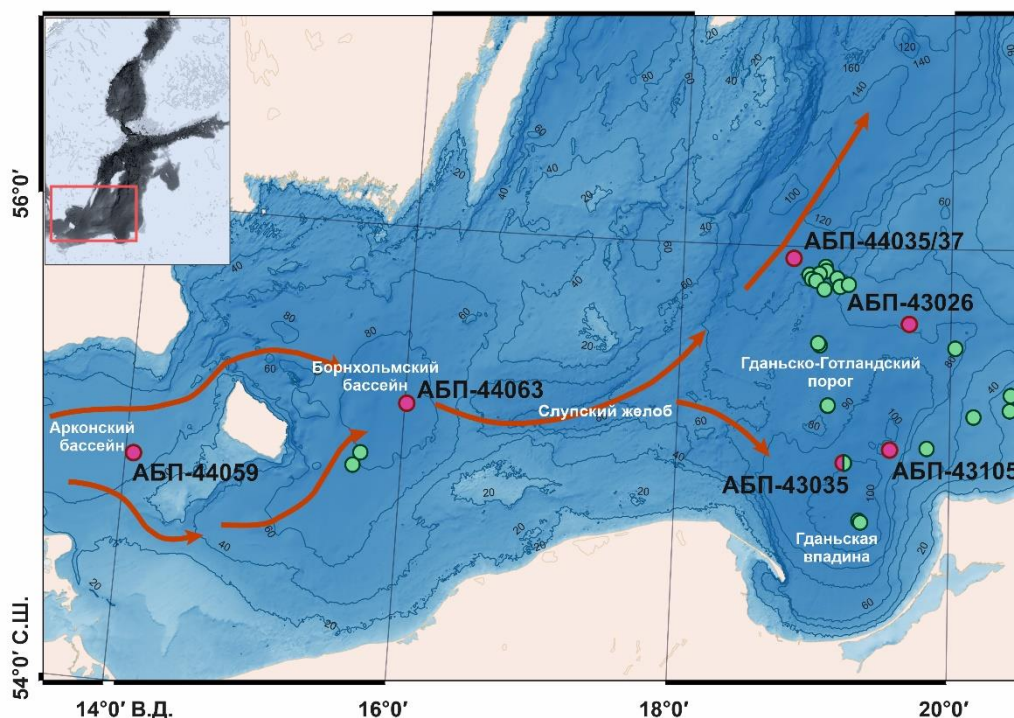


Рисунок 1 — Карта-схема района исследования и расположения точек отбора осадков (зеленые — поверхностные осадки, красные — осадочные колонки). Направление затоков вод Северного моря представлено на основе Matthäus (2006) и Mohrholz et al. (2015). Батиметрия построена по базе данных Балтийского моря v 0.9.3 (Baltic Sea Hydrographic Commission, 2013).

### Глава 3. Распределение бентосных фораминифер в современных донных осадках юго-восточной части Балтийского моря в зависимости от изменений параметров среды

По данным анализа поверхностных осадков, отобранных в российском секторе юго-восточной части Балтийского моря и Борнхольмском бассейне, выявлено, что сообщества бентосных фораминифер характеризовались крайне низким биоразнообразием. В сообществах резко преобладали мелкие особи агглютинированных фораминифер простой однокамерной конструкции, что является следствием низкой солености (Brodiewicz, 1965; Hermelin, 1987; Vinczewska, 2017). Таким образом, классический подход к реконструкции условий среды, основанный на качественном микропалеонтологическом анализе до уровня вида и дальнейшем расчете различных индексов, в Балтийском море неприменим, и требует модификации. Одной из вариаций анализа является корреляция условий осадконакопления и распространения родов бентосных фораминифер при изучении обобщенного сообщества (живые и мертвые особи), которое отражает усредненные долговременные условия (Schröder-Adams 2006) и является примером ископаемого материала (Murray and Alve, 2011).

Минимальные концентрации и низкое биоразнообразие фораминифер отмечены в донных отложениях плато Рыбачий (рис. 2), где найдены только редкие камеры агглютинированного рода *Psammosphaera* spp. Сочетание высокодинамических гидрологических условий и пониженной солености мелководной прибрежной зоны, а также присутствия крупнозернистых осадков с низким содержанием органического углерода создают крайне

неблагоприятную среду для обитания фораминифер. В результате только этот толерантный род (Baccaret, 1987; Murray and Alve, 2011) способен выжить в песчаных осадках плато Рыбачий.

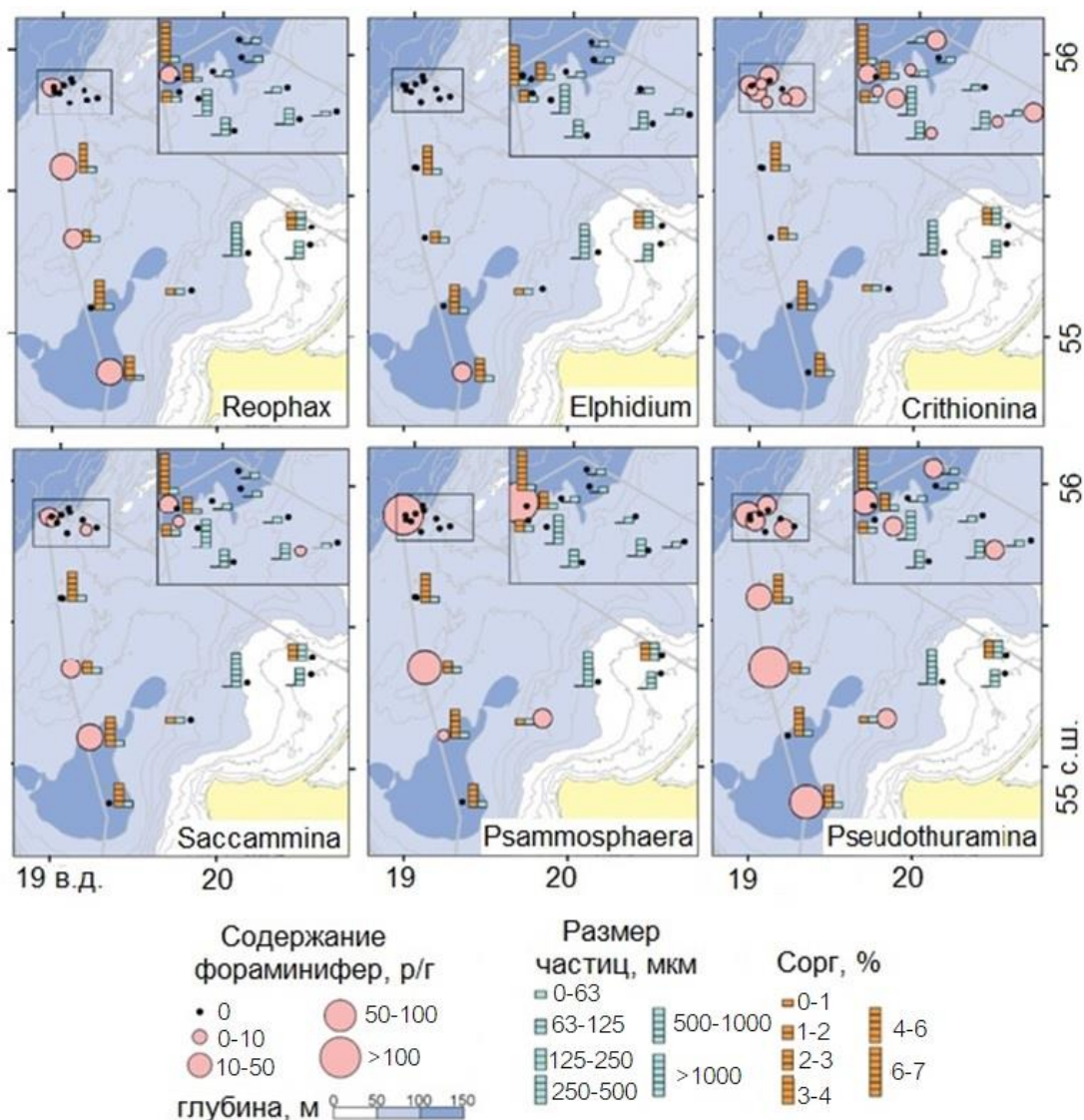


Рисунок 2 — Распространение характеристик донных осадков и родов бентосных фораминифер в поверхностных отложениях российского сектора юго-восточной части Балтийского моря.

Для Гданьского бассейна и склона Готландского бассейна характерно увеличение с глубиной концентрации раковин и разнообразия родов фораминифер в поверхностных осадках одновременно с ростом содержания органического углерода и уменьшением размерности отложений (рис. 2). Анализ архива гидрологических данных (2014-2018 гг.) выявил на этих участках близкие к нулю концентрации растворенного кислорода, которые указывают на наличие повторяющейся гипоксии (рис. 3), что, вероятнее всего, является следствием расходования кислорода на окисление большого количества органики. В этих районах в течение пятилетнего исследуемого периода температуры придонной воды изменялись в относительно узком диапазоне. В то же время в Гданьском бассейне диапазон изменения солености придонного слоя и межквартильное расстояние были довольно велики, что указывает на относительно нестабильные условия среды. Склон Готландского бассейна, напротив, характеризовался относительно стабильными гидрологическими условиями. Особи агглютированного рода инфауны *Crithionina* были обнаружены только на склоне Готландского бассейна, что отражает предпочтение родом относительно стабильных условий окружающей среды, а также обилия пищи. Агглютированные раковины родов *Psammosphaera*, *Pseudothuramina*, *Reophax* и *Saccamina* встречаются по всему Гданьскому

бассейну, а также на склоне Готландского бассейна. В предыдущих исследованиях все эти роды обнаружены в мелководных местообитаниях с выраженными вариациями физико-химических условий, а также в различных типах осадков (Lagoe, 1979; Goldstein and Harben, 1993, Hayward and Hollis, 1994). Адаптация к различным условиям среды способствовала широкому распространению этих родов в исследуемом районе. Концентрации раковин *Psammosphaera* spp., *Pseudothuramina* spp. и *Saccamina* spp. в осадках росли с глубиной вместе с уменьшением размерности частиц донных отложений и увеличением содержания органического углерода и, следовательно, большей доступностью пищи, а также менее динамичной придонной гидрологической обстановкой. *Saccamina* spp. распространен в районах заливов, лагун и шельфов в условиях относительно широкого диапазона солености 28–32 пс (Lagoe, 1979; Goldstein, 1988). В настоящем исследовании была показана толерантность этого рода к значительно более низким значениям солености: например, в пределах Гданьско-Готландского порога этот род обнаружен при значениях солёности, равных 10.3 пс.

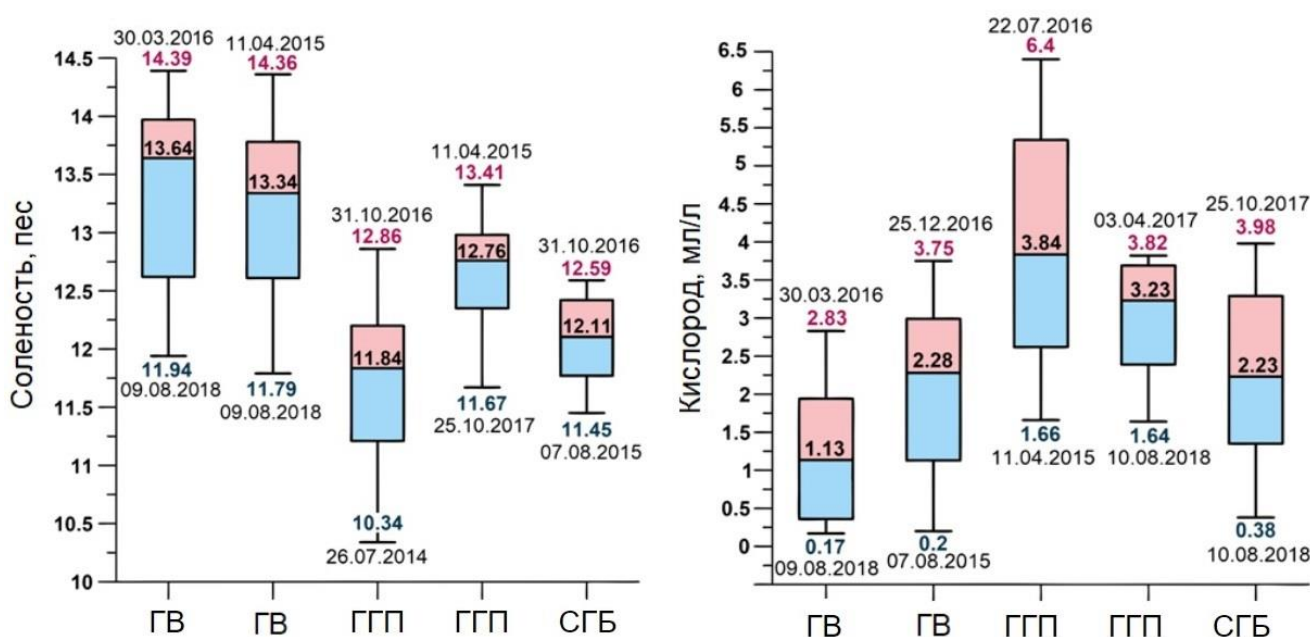


Рисунок 3 — Диаграмма размаха значений солености и кислорода в придонном слое воды на разрезе, расположенном вдоль западной границы российского сектора юго-восточной части Балтийского моря, (осредненные данные за период 2014–2018 гг.); GV — Гданьская впадина; ГПП — Гданьско-Готландский порог; СГБ — склон Готландского бассейна.

Карбонатные раковины сообщества *Elphidium* (*Cribrroelphidium*) были найдены в Гданьской впадине, а также в Борнхольмском бассейне (рис. 2). В Гданьской впадине диапазон значений солености был довольно широким (11.8–14.4 пс), а также было зафиксировано абсолютное максимальное значение солености для российского сектора юго-восточной части Балтийского моря в течение пятилетнего периода наблюдений (рис. 3). Изменчивость условий указывает на спорадические затоки североморских вод, создающие необходимый уровень солености для рода *Elphidium* (*Cribrroelphidium*). Данные гидрологических съемок, выполненных при отборе поверхностных осадков, также указывают на адвекцию североморской воды в Гданьскую впадину в периоды, предшествующие проведению работ. Так как минимальные значения концентрации растворенного кислорода в этом районе близки к нулю (рис. 3), вероятно, гипоксия в придонном слое развивается часто. Сочетание описанных условий объясняет, почему оппортунистический род *Elphidium* (*Cribrroelphidium*), толерантный к

неблагоприятным условиям среды, таким как пониженные значения солености и кислорода (Brodiewicz, 1965; Lutze, 1965; Condratsen, 1993; Vinczewska, 2017), резко доминировал среди карбонатных видов, обнаруженных в исследуемом регионе.

В донных отложениях Гданьско-Готландского порога родовое разнообразие бентосных фораминифер было очень низким (рис. 2). Однако здесь были зафиксированы максимальные значения концентрации фораминифер. Донные осадки представлены плохо отсортированными песками и песчаными илами, характеризующимися относительно низким содержанием органического углерода и соответствующими выходам на поверхность ледниковых отложений (Emelyanov, 2002; Dorokhov et al., 2018). Высокая изменчивость гидрологических условий (рис. 3), зафиксированная на пороге, обусловлена близким расположением галоклина ко дну. Низкие значения температуры, минимальная соленость придонного слоя воды, а также постоянное присутствие кислорода свидетельствуют о влиянии холодного промежуточного слоя воды. Отсутствие илистых отложений на большей площади поверхности порога можно объяснить активной динамикой вод, в том числе, действием внутренних волн, возникающих на галоклине (Блажчишин, 1998). Агглютинированные раковины родов *Psammospaera* и *Pseudothurammina* были обнаружены в осадках Гданьско-Готландского порога в максимальных концентрациях по сравнению со всем регионом исследования. Фораминиферы родов *Saccamina* и *Reophax* также найдены в отложениях порога, однако в меньшем количестве. *Reophax* и *Pseudothurammina* относятся к родам инфауны и обитают в толще осадка (Baccaret, 1987; Goldstein and Harben, 1993; Hayward and Hollis, 1994; Egger et al., 2003), поэтому они лучше приспособлены к нестабильным условиям среды Гданьско-Готландского порога, ассоциированным с галоклином, а также менее подвержены влиянию динамичной придонной обстановки порога. Особи *Pseudothurammina*, *Psammospaera* и *Reophax* обитают в песчаных отложениях, обедненных органическим веществом (Goldstein, Harben, 1993; Murray and Allve, 2011). *Saccamina* spp. встречаются в илистых отложениях с включением различного количества песчаного материала мелкого и крупного размера (Lagoe, 1979). Описанное предпочтение субстрата может служить объяснением высокого обилия раковин в плохо отсортированных отложениях с различным содержанием органики, распространённых на пороге. Кроме того, кислород всегда присутствует в придонных водах порога ввиду небольших глубин в данном районе, а также влияния холодного промежуточного слоя, обогащенного кислородом, и вод затоков. Вероятно также, что положение галоклина вблизи дна в пределах порога способствует накоплению взвешенного вещества и, следовательно, доступности пищи в придонном слое. Насыщение кислородом придонных вод, а также обилие пищи объясняют очень высокие концентрации фораминифер в осадках Гданьско-Готландского порога.

В Борнхольмском бассейне концентрации фораминифер были выше, чем в среднем в Юго-Восточной Балтике. Кроме того, здесь было найдено максимальное родовое разнообразие — в осадках района присутствовали все роды, кроме *Crithionina*. Карбонатные камеры рода *Elphidium* (*Cribrorhynchium*) присутствовали на всех станциях бассейна. В данном районе обнаружена наибольшая концентрация раковин рода *Saccamina*. Накопление алевроитовых и илистых отложений с высоким содержанием органического углерода, а также значительно более высокая соленость придонного слоя воды, ввиду близости Датских проливов, создают благоприятные условия для обитания фораминифер.

#### Глава 4. Условия осадконакопления в Готландском бассейне в среднем и позднем голоцене

Динамика палеоокеанологических условий в течение последних 7.1 тыс. кал. л. реконструирована по данным комплексного анализа непрерывного осадочного разреза,



составленного из двух колонок донных отложений, отобранных в Восточном Готландском бассейне (рис. 4). Вариации САК (Trouet et al., 2009; Olsen et al., 2012) рассмотрены как один из ведущих факторов формирования режима осадконакопления (Harff et al., 2011; Schimanke et al., 2012).

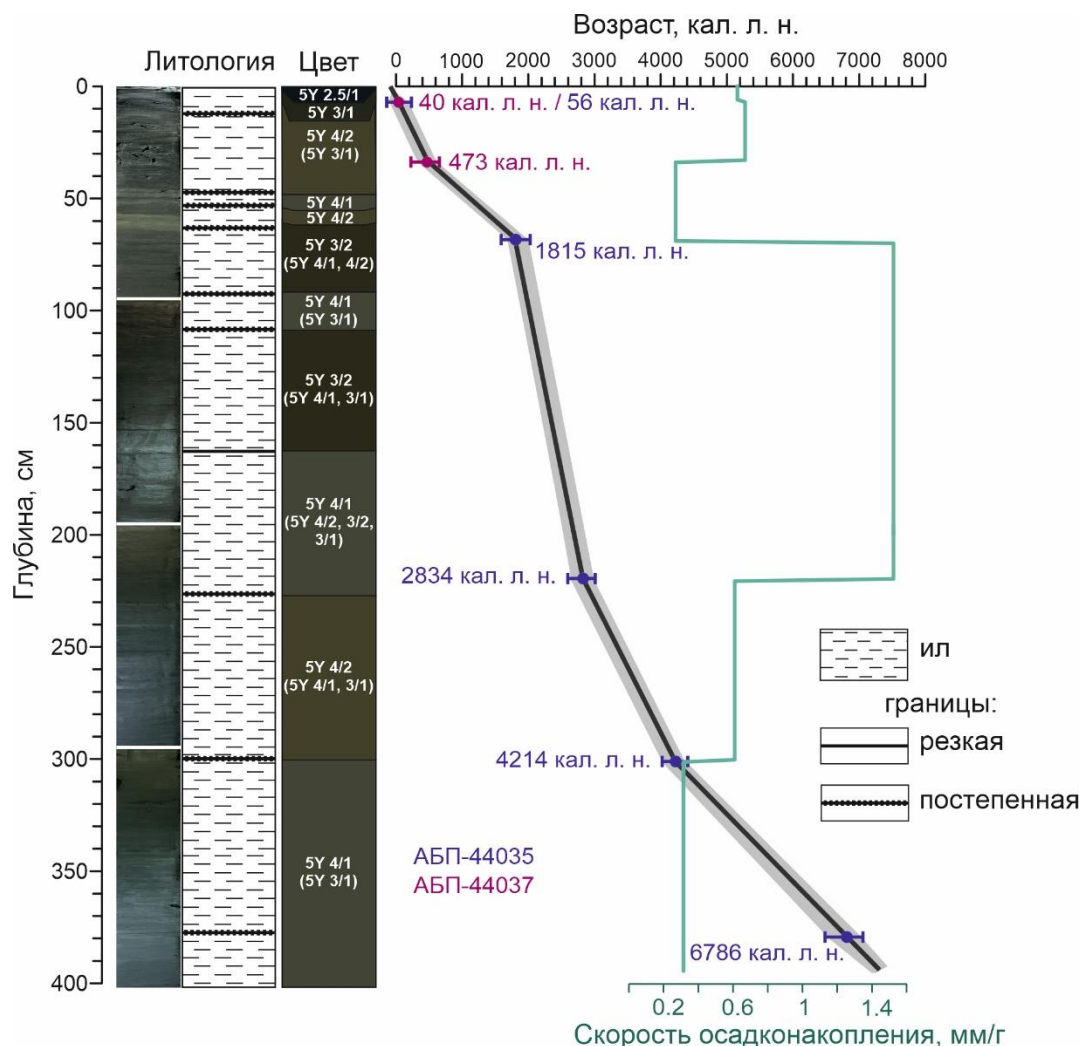


Рисунок 4 — Возрастная модель совмещенной секции колонок АБП-44035/37, дополненная комбинированной литологией для обеих колонок, а также скоростью осадконакопления. На графике возрастной модели: серая область показывает доверительный интервал 95%, фиолетовые и лиловые точки обозначают радиоуглеродные датировки, погрешность датировок  $\pm 2\sigma$  указана отрезками.

Исследуемым разрезом вскрыт только верхний литостратиграфический комплекс гомогенных илов литориновой стадии. Отсутствие интервалов слоистых осадков (исключая верхние 2 см), формирующихся в условиях гипоксии, отражает насыщение кислородом вод в период осадконакопления. Основным механизмом вентиляции придонных вод в районе отбора колонки даже в период стагнации является поступление вод из Слупского желоба (внутрипикноклинные интрузии), которые носят достаточно устойчивый и частый характер (Zhurbas & Paka 1997, 1999; Meier et al., 2006; Reissmann et al., 2009). Таким образом, можно заключить, что распространение бентосных фораминифер вдоль осадочного разреза, главным образом, отражает изменение солености придонных вод.

Наличие раковин *Elphidium (Cribroelphidium) spp.* в нижней части осадочного разреза (рис. 5) позволяет сделать вывод, что соленость придонного слоя воды превышала 12 пс (Lutze, 1965; Frenzel et al., 2005) уже около 6.9 тыс. кал. л. н., что сопоставимо с опубликованными данными реконструкций придонной солености: 6.9 – 7.2 тыс. кал. л. н. (Binczewska et al., 2018; van Wirdum et al., 2019; Häusler et al., 2017). Начало голоценового климатического оптимума

ГКО) (7.0–6.5 тыс. кал. л. н.) характеризуется быстрым увеличением содержания ОВ в осадках (рис. 5), отражающим увеличение первичной продуктивности в результате сочетания факторов: потепления климата в начале ГКО (Seppä et al., 2005; Renssen et al., 2012); увеличения толщины фотического слоя при массовой флокуляции и осаждении взвешенных глинистых частиц вследствие увеличения солености (Winterhalter, 1992); поступления морской воды, обогащенной фосфором (Bianchi et al., 2000; van Wirdum et al., 2019). Совместное влияние роста продуктивности и усиления стратификации водной толщи из-за возросшей солености придонных вод привело к широкому развитию гипоксии в придонном слое воды во время ГКО (Gustafsson, Westman, 2002; Emeis et al., 2003; Zillén et al., 2008; van Wirdum et al., 2019), которая отразилась на формировании в глубоководных районах Балтийского моря пачек слоистых отложений, богатых органикой. Бескислородные условия, вероятно, не затронули более мелководные районы, в том числе — место формирования осадочного разреза (117 м). Низкое отношение Mn/Fe по всему разрезу указывает на отсутствие смены окислительно-восстановительных условий и фракционирования элементов (Marsh et al., 2007) благодаря постоянному присутствию кислорода в придонном слое воды.

Низкие концентрации раковин *Elphidium (Cribroelphidium) spp.* в осадках в интервале 6.8–5.6 тыс. кал. л. н. отражают постепенный переход от пресной к солоноватоводной среде. В данный временной интервал низкая повторяемость затоков была реконструирована даже в Борнхольмской котловине, расположенной западнее (Binczewska et al., 2018). В последующем интервале (5.6–3.2 тыс. кал. л. н.) концентрация раковин *Elphidium (Cribroelphidium) spp.* в осадках умеренно возрастает, указывая на незначительное влияние вод повышенной солености в районе исследования. Отмечены два коротких интервала повышенных концентраций раковин *Elphidium (Cribroelphidium) spp.*, отражающих более частые затоки соленых вод: 5.3–4.8 и 3.9–3.4 тыс. кал. л. н. Вышеупомянутые периоды соответствуют усилению положительного индекса САК (Olsen et al., 2012; рис. 5) и, следовательно, преобладанию западных ветров, направляющих соленые воды Северного моря в Балтийское (Trouet et al., 2009). В течение ранней и средней литориновых стадий (6.9–3.2 тыс. кал. л. н.) агглютинированные фораминиферы были представлены преимущественно особями рода *Psammospaera* (рис. 5). Практически полное отсутствие раковин *Reophax spp.* вдоль по разрезу, за исключением единичного появления 3.9 тыс. кал. л. н., может отражать пониженную соленость (менее 13 ‰) из-за слабого влияния североморских вод на относительно мелководный район отбора колонки в этот период. Повышенное содержание органического вещества в интервале 6.5–3.2 тыс. кал. л. н. указывает на интенсификацию первичной продукции в условиях более теплого климата во время ГКО. Дополнительным фактором, способствующим сохранению органического вещества в осадках, может быть усилившаяся стратификация (Zillén et al., 2008; Carstensen et al., 2014). Холодные события Бонда 4 и 3 (Bond et al., 1997) нашли отражение в снижении содержания ОВ в интервалах 5.8–5.5 и 4.4–4.1 тыс. кал. л. н. соответственно.

После окончания ГКО относительно низкое содержание ОВ в осадках в пределах интервала 3.2–2.2 тыс. кал. л. н. отражает снижение первичной продукции в результате похолодания климата (рис. 5). Формированию однородных или слабослоистых осадочных толщ с низким содержанием органики в данный период способствовало улучшение вентиляции придонного слоя воды ввиду снижения частоты затоков и сопутствующего ослабления галоклина в интервале 4.0–2.0 тыс. кал. л. н. (Gustafsson and Westman, 2002; Emeis et al., 2003; Zillén et al., 2008; Häusler et al., 2017). Резкое снижение содержания ОВ после 2.8 тыс. кал. л. н. связано с периодом похолодания климата в Североатлантическом регионе, известным как холодное событие Бонда 2 (Bond et al., 1997).

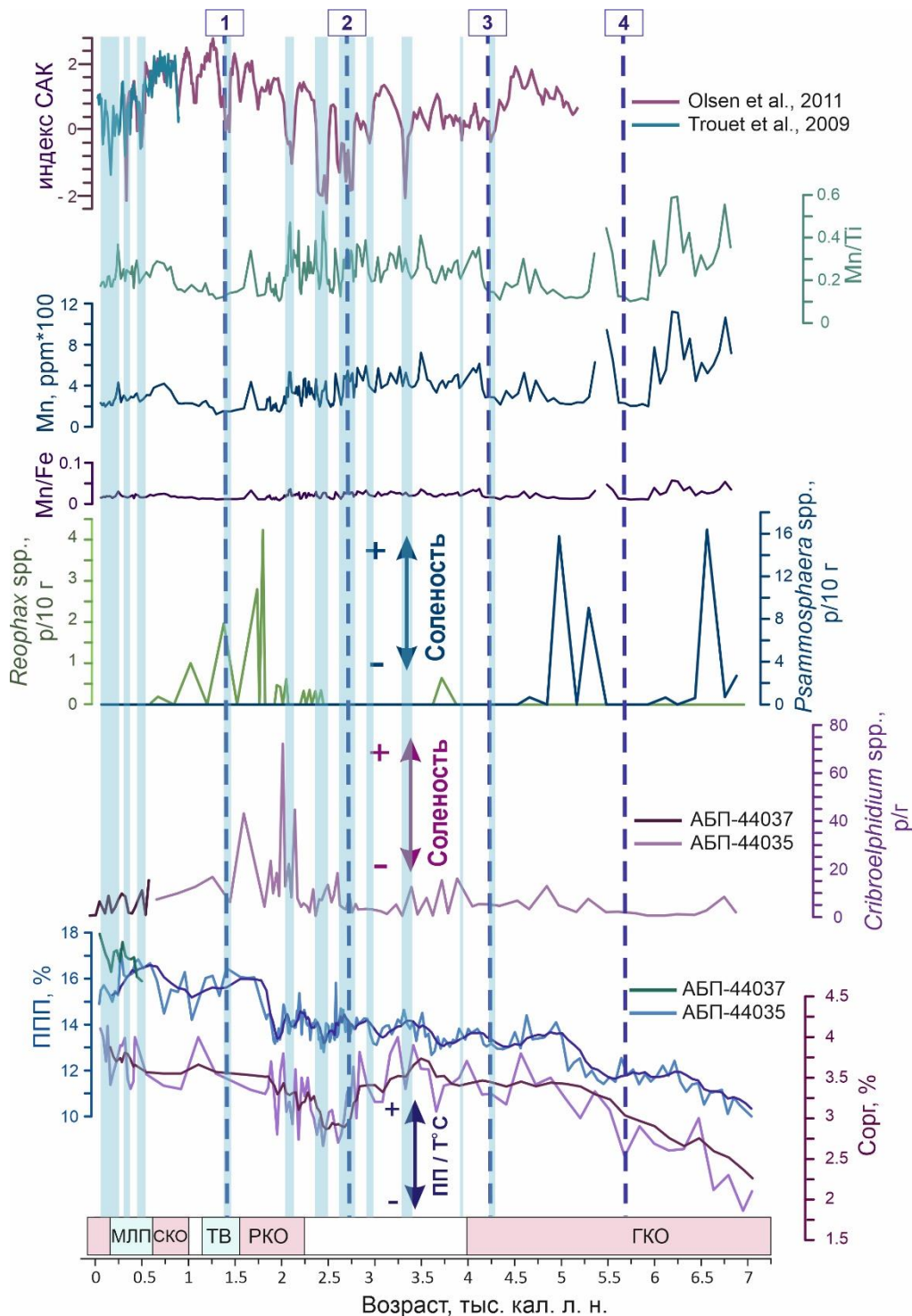


Рисунок 5 — Распределения геохимических и микропалеонтологических данных, объединенные для двух колонок (АБП-44035 и АБП-44037). Холодные события Бонда отмечены вертикальными синими пунктирными линиями. Климатические события голоцена указаны на нижней панели: ГКО — голоценовый климатический оптимум; РКО — римский климатический оптимум; ТВ — темные века; СКО — средневековый климатический оптимум; МЛП — малый ледниковый период. Изменение индекса САК в течение последних 5 тыс. кал. л. отмечены на верхней панели. ПП — первичная продукция, ППП — потери при прокаливании.

Концентрации *Elphidium* (*Cribroelphidium*) spp. в интервале 3.2–2.3 тыс. кал. л. н. оставались низкими, исключая умеренный пик (2.6 тыс. кал. л. н.), соответствующий короткому периоду повышения солёности. Такое распределение фораминифер, наряду с практически полным отсутствием раковин *Reophax* spp., отражает низкую солёность придонного слоя воды, обусловленную снижением частоты затоков. Реконструкция индекса САК показала умеренно

высокие значения около 2.6 тыс. кал. л. н., за которыми следовало резкое снижением показателя до отрицательных значений, продолжавшееся до 2.3 тыс. кал. л. н. (Olsen et al., 2012). Такое изменение значения индекса с положительного на резко отрицательное является причиной преобладания восточных ветров в Балтийском регионе и меньшей частоты затоков.

В пределах римского климатического оптимума (РКО, 2.2–1.6 тыс. кал. л. н.) содержание ОВ в осадках постепенно возрастает (рис. 5), отражая увеличение первичной продукции, вызванное потеплением климата. Многие реконструкции показывают аномально теплый климат в Балтийском регионе (Mann, 2007; Seppä et al., 2015) и широкое распространение гипоксии в придонном слое (Zillén et al., 2008; van Wirdum et al., 2019) в этот период. Резкое увеличение концентрации *Elphidium (Cribroelphidium) spp.* отмечено 2.1 тыс. кал. л. н., а максимальное значение — 2.0 тыс. кал. л. н. В это же время количество *Reophax spp.* достигало наивысших концентраций. Такое распределение фораминифер свидетельствует о выраженном влиянии североморских вод на исследуемый район и соответствует высоким положительным значениям индекса САК (Olsen et al., 2012), которые обусловили режим атмосферной циркуляции, благоприятный для интенсификации придонного водообмена (рис. 5). Несмотря на усиление стратификации, отсутствие литологических (слоистость осадков) и геохимических (низкие стабильные значения соотношения Mn/Fe) признаков гипоксии отражают аэрацию района формирования осадочного разреза внутрипикноклинными интрузиями.

В период темных веков (ТВ) умеренное снижение содержания ОВ, выделяющееся на общем тренде увеличивающихся значений (рис. 5), соответствует уменьшению первичной продуктивности на фоне похолодания. Однако холодное событие Бонда 1 (1.6–1.4 тыс. кал. л. н. (Bond et al., 1997)) не выражено четко в распределении ОВ. В начале ТВ (1.6–1.4 тыс. кал. л. н.) концентрации *Elphidium (Cribroelphidium) spp.* и *Reophax spp.* в осадках резко уменьшались, указывая на снижение придонной солености, на фоне умеренно отрицательных значений индекса САК (Olsen et al., 2012; рис. 5). Повышенные концентрации *Elphidium (Cribroelphidium) spp.* ближе к окончанию ТВ (после 1.3 тыс. кал. л. н.) предполагают умеренное влияние соленых североморских вод на исследуемый район, связанное с положительным индексом САК в данное время. После окончания ТВ содержание ОВ в осадках демонстрирует умеренный рост, отражающий увеличение первичной продуктивности (рис. 5) в результате потепления климата, связанного с положительной фазой САК в это время, обусловившей более мягкие зимы в Европе (Harff et al., 2011; Schimanke et al., 2012; Carstensen et al., 2014; Häusler et al., 2017). Во время средневекового климатического оптимума (СКО) снижающиеся концентрации *Elphidium (Cribroelphidium) spp.* свидетельствуют об уменьшении влияния затоков на условия осадконакопления в Готландском бассейне, что также отмечено в других исследованиях (Kotilainen et al., 2014; Häusler et al., 2017). Резко положительные значения индекса САК обусловили чрезвычайно сильные западные ветры и, одновременно, аномально сильный баротропный градиент давления, препятствовавший распространению соленой воды восточнее (Zorita and Laine, 2000; Schrum, 2001). Таким образом, можно предположить, что соленость в центральной части моря понизилась. Во время малого ледникового периода (МЛП) снижение содержания ОВ в осадках отражает более низкую первичную продуктивность в ответ на более холодные климатические условия (Zillén et al. 2008; Kabel et al. 2012; Häusler et al., 2017). По мере приближения к интервалу современного потепления (СП) содержание ОВ в отложениях увеличивается, достигая максимальных значений ближе к вершине осадочного разреза. Накопление слоистых отложений в самом верхнем горизонте указывает на осадконакопление в условиях повторяющейся гипоксии в придонном слое воды. В начале МЛП повышенное содержание бентосных фораминифер соответствует все еще высоким значениям индекса САК.



Снижение концентрации *Elphidium (Cribroelphidium)* spp. в МЛП и СП (рис. 5) указывает на сокращение повторяемости затоков, которое также выявлено в других бассейнах Балтийского моря (Kotilainen et al., 2014; Häusler et al., 2017; Binczewska et al., 2018). Это связано преимущественно отрицательным индексом САК в это время (Trouet et al., 2009; Olsen et al., 2012), ставшим причиной уменьшения повторяемости западных ветров.

## **Глава 5. Океанологические условия южной части Балтийского моря в позднем голоцене**

Изменение условий осадконакопления в течение последнего тысячелетия в Арконском, Борнхольмском, и Гданьском бассейнах реконструировано на основе комплексного анализа пяти коротких (56–46 см) осадочных колонок (рис. 6). В колонке АБП-43026, отобранной на Гданьско-Готландском пороге (рис. 6), нижний слой голубоватых глинистых отложений накоплен во время озерной Анциловой стадии. Очень низкое содержание ОВ в осадках отражает пониженную продуктивность в холодноводных условиях, а высокое соотношение Si/Ti (рис. 7) соответствует обилию диатомовых водорослей. Отсутствие раковин или внутренних оболочек фораминифер указывает на пресноводные условия формирования осадков. Включения крупнозернистого материала, на которые указывают резкие пики соотношения Zr/Rb и параметров сортируемого сита (СС) в данном слое осадков и вышележащих отложениях, отражают высокодинамические гидрологические условия, вероятно, связанные с литориновой трансгрессией. Последнее, скорее всего, также отражено в одновременных пиках в распределении параметров Mn, соответствующих изменению окислительно-восстановительных условий при смене пресноводных условий солоноватоводными. Первое появление *Elphidium (Cribroelphidium)* spp. в этом же интервале подтверждает первичное поступление вод повышенной солености в Гданьский бассейн после 7.7 тыс. кал. л. н. Вышележащие отложения сформированы в литориновую и постлиториновую стадии развития Балтийского моря, что отражает крайне низкие скорости осадконакопления, обусловленные расположением керна на топографической возвышенности порога. Так как Гданьско-Готландский порог находится на пути североморских вод, поступающих в Гданьский бассейн из Слупского желоба (Emelyanov, 2002), и близость галоклина ко дну на пороге обуславливает размыв осадков внутренними волнами, возникающими на уровне скачка плотности (Blazhchishin, 1998), скорость осадконакопления здесь низкая. Таким образом, при реконструкции условий в Гданьском бассейне колонка АБП-43026 представляет интерес только с точки зрения понимания условий осадконакопления в районе Гданьско-Готландского порога на большом временном масштабе.

Нижние интервалы колонок, отобранных в Западной Балтике (АБП-44059 и АБП-44063) и Гданьской впадине (АБП-43035), были накоплены в период ТВ, характеризующийся похолоданием климата в Европе (Bond, 1997; Serrä et al., 2005). В осадочных разрезах данному периоду соответствует меньшее содержание ОВ (рис. 7) вследствие снижения продуктивности поверхностных вод, обусловленного похолоданием климата. Высокие соотношения Si/Ti в изученных кернах отражают значительный вклад в первичную продукцию диатомовых водорослей, имеющих конкурентное преимущество после холодных зим. Стоит отметить, что соотношение Si/Ti в осадках Арконского бассейна (АБП-44059) в два раза выше, чем в осадках Борнхольмского бассейна (АБП-44063). Более раннее время начала цветения из-за раннего установления термической стратификации на мелководном участке отбора колонки в Арконском бассейне может быть возможной причиной более высокой общей годовой продукции по сравнению с Борнхольмским бассейном. Относительно стабильные значения параметров Mn соответствуют отсутствию фракционирования элементов, указывая на стабильную вентиляцию водной толщи (Marsh et al., 2007), что могло послужить

дополнительным фактором, снижающим накопление органического вещества в осадках за счет его окисления.

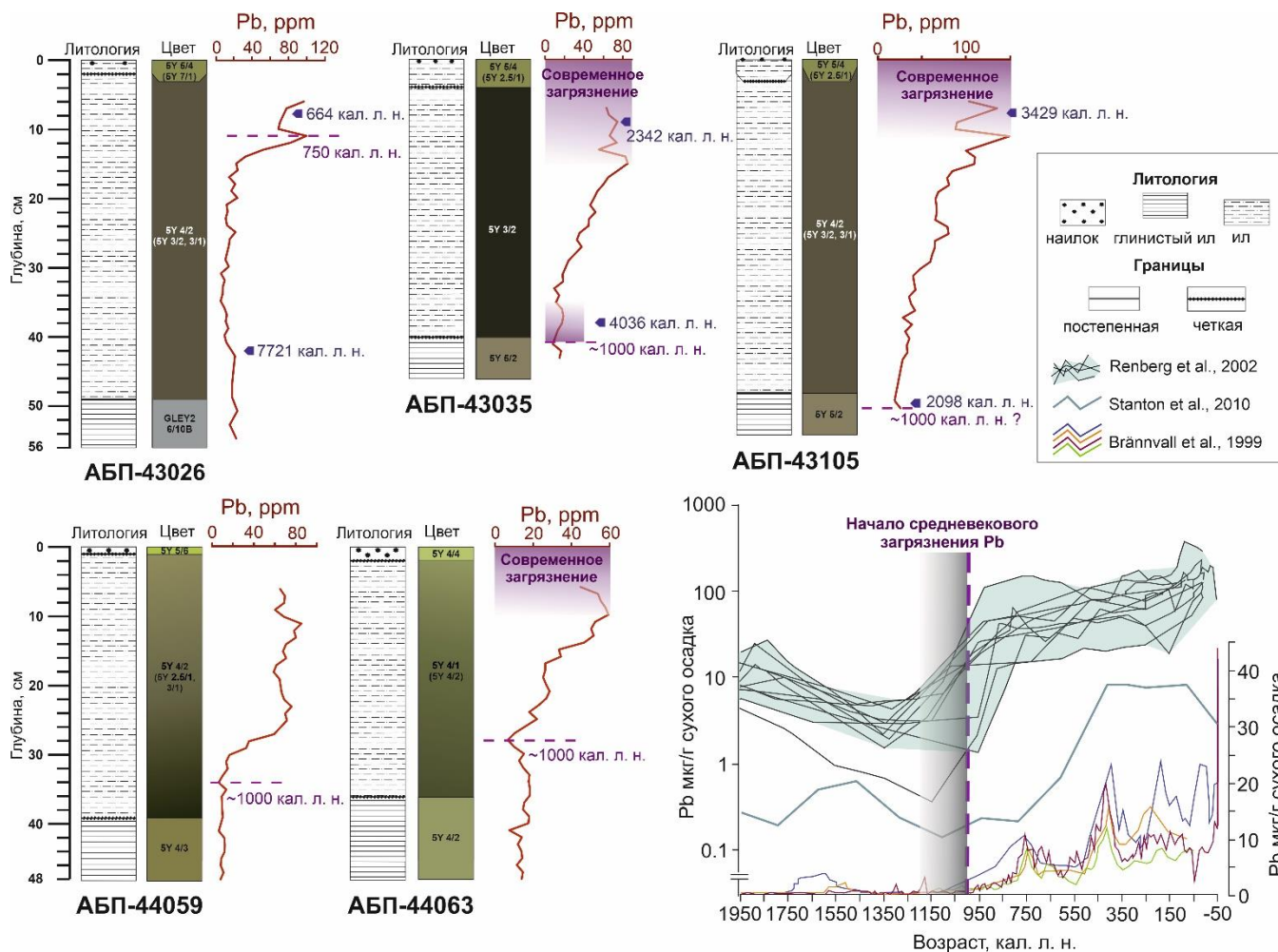


Рисунок 6 — Литологический состав изученных колонок и распределение концентраций Pb. Цвета обозначены кодами в соответствии с таблицей Munsell Soil Color Chart. Радиоуглеродные датировки обозначены синим цветом, Pb (изохроны) — лиловым. Затененные фиолетовые области на кривых Pb указывают на современное загрязнение Pb и неопределенности в начале средневекового загрязнения Pb. В нижней правой части представлено распределение Pb за последние 2000 лет на основе объединенных данных (Renberg et al., 2002; Stanton et al., 2010; Brännvall et al., 1999).

Численность *Elphidium (Cribroelphidium) spp.* в отложениях Западной Балтики (рис. 7), накопленных в период ТВ, в среднем ниже, чем в более поздних интервалах. Тем не менее, отмечены различия в условиях осадконакопления для разных районов исследования. Так, в колонке АБП-44063 низкие концентрации фораминифер наряду с низкими значениями соотношения Zr/Rb и среднего размера и содержания СС соответствуют умеренному поступлению затоков в Борнхольмский бассейн. В Арконском бассейне (АБП-44059) численность *Elphidium (Cribroelphidium) spp.* выше, чем в Борнхольмском, что в сочетании с повышенными значениями соотношения Zr/Rb и среднего размера и содержания СС указывает на интенсивную придонную динамику, связанную с деятельностью затоков. Во время ТВ отрицательный индекс САК изменился на резко положительный (Olsen et al., 2012), что привело к смене блокирования западных ветров их аномально сильной активностью. Такие метеорологические параметры обусловили умеренный придонный водообмен между Балтийским и Северным морями, который затронул главным образом Арконский бассейн.

Интервалу СКО соответствуют стабильные теплые климатические условия (Reckermann, 2014). Положительная фаза САК во время СКО (Trouet et al., 2009; Schimanke et al.,

2012) обусловила перенос теплых воздушных масс в Европу и более теплые зимы. В осадках Западной Балтики (рис. 7) содержание ОВ высокое вследствие более интенсивной поверхностной продуктивности, связанной с более теплым климатом. В то же время отмечены более низкие значения соотношения Si/Ti по сравнению с ТВ, что отражает снижение продукции диатомовых водорослей. Скорее всего, повышение температуры поверхностных вод привело к доминированию среди продуцентов азотфиксирующих цианобактерий (Kabel et al., 2012).

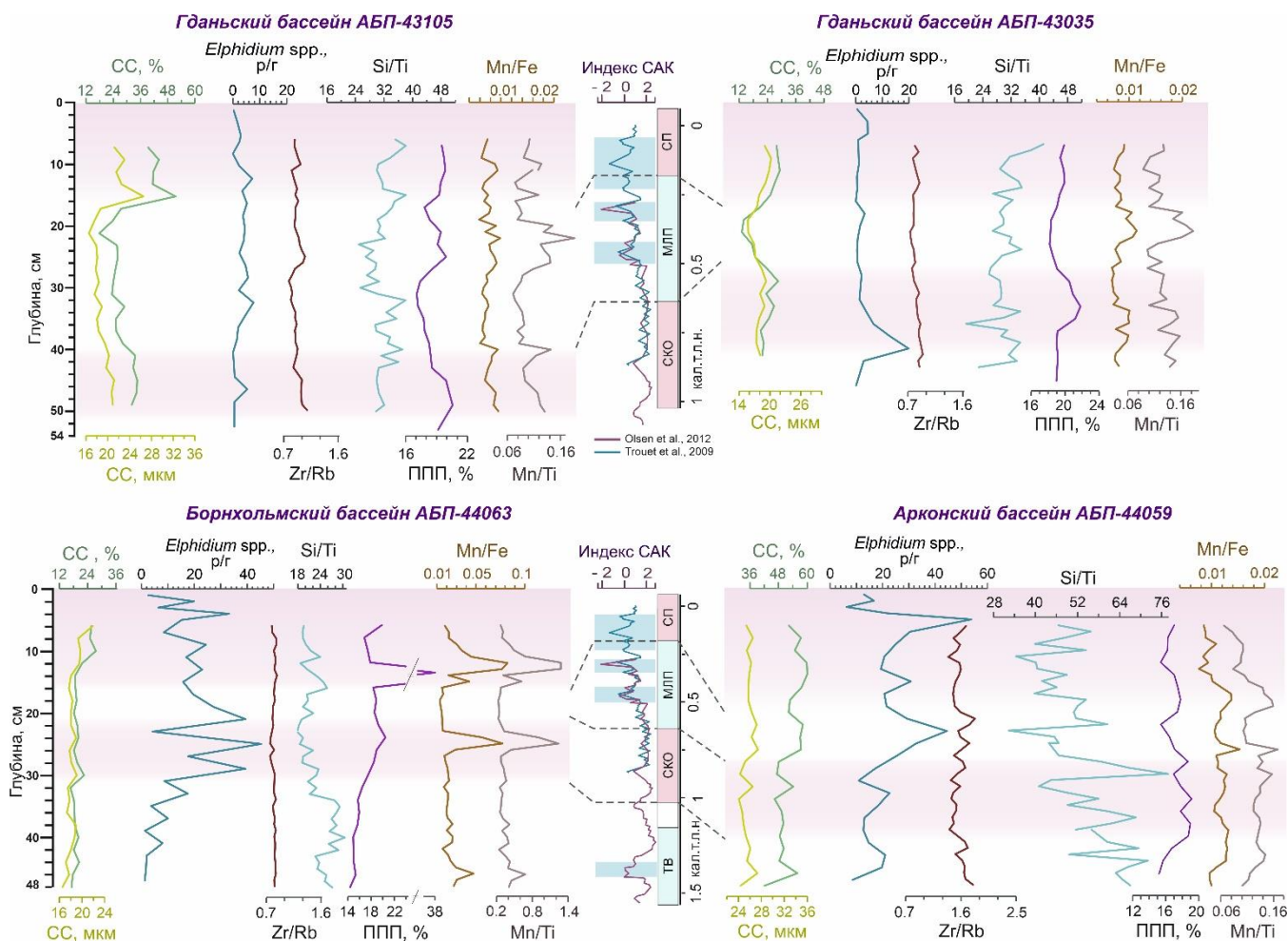


Рисунок 7 — Распределение геохимических, микропалеонтологических и гранулометрических данных в осадочных колонках, полученных в Арконском, Борнхольмском и Гданьском бассейнах. Периоды потепления выделены красным цветом. Климатические события голоцена отмечены на боковой панели: ТВ — Темные века, СКО — средневековый климатический оптимум, СП — современное потепление. СС — сортируемый сilt. Вариации индекса САК представлены согласно Olsen et al. (2012), Trouet et al. (2009).

В осадочном разрезе, отобранном в Арконском бассейне, пики высоких значений Si/Ti соответствуют относительным понижениям содержания ОВ, что может свидетельствовать о развитии диатомовых водорослей в холодный период на фоне снижения общей продуктивности. В осадках Борнхольмского и Арконского бассейнов пики параметров Mn совпадают с более высоким содержанием органики, что отражает обогащение Mn в результате возможной диагенетической миграции в условиях гипоксии. Более сильный галоклин из-за увеличения солености придонного слоя может быть дополнительным условием, способствующим лучшей сохранности органического вещества из-за недостаточной вентиляции. Выраженное увеличение численности *Elphidium* (*Cribrorhynchium*) spp. в осадках Арконского и Борнхольмского

бассейнов (рис. 7) отражает повышение придонной солености, обусловленное частыми затоками во время СКО. Более того, одновременное увеличение содержания и среднего размера СС в Арконском бассейне указывает на интенсивную придонную гидродинамику, вероятно обусловленную интенсификацией затоков. Положительный индекс САК (Trouet et al. 2009; Schimanke et al. 2012) повлиял на увеличение скорости западных ветров и количества интрузий соленой воды.

Как и в колонках, отобранных в Западной Балтике, в осадках Гданьской впадины заметно увеличение содержания органического вещества в течение теплого интервала СКО, отражающее повышение продуктивности поверхностных вод (рис. 7). Относительно низкое соотношение Si/Ti предполагает снижение вклада диатомовых водорослей в первичную продукцию. В распределении параметров Mn признаки бескислородного диагенеза не выражены. Отложения западной части Гданьской впадины (АБП-43035) характеризуются максимальной концентрацией *Elphidium (Cribroelphidium) spp.* (рис. 7), свидетельствующей о повышении солености в результате интенсификации придонного водообмена. Сравнительно меньшая численность фораминифер в отложениях Гданьской впадины соответствует снижению солености вследствие расположения точек отбора колонок вдали от Датских проливов. В колонке, отобранной в восточной части впадины (АБП-43105), увеличение численности фораминифер незначительно ввиду сложного рельефа бассейна. Районы отборов колонок, характеризующиеся одинаковой глубиной, разделены возвышенностью (Krek et al., 2020), что может как затруднять распространение вод затоков, так и способствовать смешению вод и последующему уменьшению солености. В обоих разрезах, на фоне в целом низких значений соотношения Zr/Rb (рис. 7), отражающих спокойную гидродинамическую обстановку, обусловленную положением точек отбора колонок значительно ниже галоклина, интервалу СКО соответствуют слегка повышенные значения. В распределении параметров СС рост значений более выражен. Такие показатели отражают умеренную интенсификацию придонной гидродинамики в Гданьской впадине.

Необходимо отметить, что ограничения возрастных моделей не позволяют провести точное стратиграфическое разделение верхних частей разрезов. К тому же в восточной части Гданьской впадины (АБП-43105) верхние осадки затронуты латеральным переотложением, которое привело к инверсии радиоуглеродного возраста. Залегающие над отложениями СКО осадки, демонстрирующие относительное снижение содержания ОВ (рис. 7), могут быть отнесены к интервалу МЛП, характеризующемуся снижением температуры. В целом пониженное содержание ОВ и повышенное соотношение Si/Ti указывают на увеличение продукции диатомей на фоне похолодания климата. В осадках Арконского и Борнхольмского бассейнов повышенное содержание бентосных фораминифер в начале МЛП соответствует все еще высоким значениям индекса САК. Общее уменьшение количества раковин *Elphidium (Cribroelphidium) spp.* в осадках обоих районов во время МЛП (рис. 7) указывает на снижение частоты затоков. Преобладание отрицательного индекса САК (Trouet et al. 2009; Olsen et al. 2012) привело к уменьшению доли западных ветров, обусловившему последующие более редкие и слабые интрузии соленых вод в Балтийское море. В целом более низкие соотношения Zr/Rb и значения параметров СС в отложениях Гданьской впадины подтверждают слабую придонную гидродинамику ввиду редких затоков, достигающих удаленных районов.

Верхние интервалы изученных отложений были отнесены к периоду современного потепления климата (СП), когда температуры поверхности моря были сопоставимы с СКО и были на 2 °C выше по сравнению с предшествующим МЛП (Kabel et al., 2012). На протяжении всего СП содержание органического вещества в осадках всех исследованных разрезов повышено, отражая высокую продуктивность поверхностных вод в более теплых условиях.

Повышенное значение соотношения  $Si/Ti$  указывает на высокую продукцию диатомовых водорослей. В колонках Западной Балтики слоистые отложения отсутствуют, отражая преимущественно кислородную обстановку осадконакопления. Более того, в Арконском бассейне наличие живых фораминифер в поверхностных отложениях предполагает насыщение кислородом придонного слоя воды во время отбора колонки. Высокий пик содержания органического вещества и высокие значения параметров  $Mn$  в осадках Борнхольмского бассейна (рис. 7) могут отражать смену окислительно-восстановительных условий при наличии хотя бы кратковременной гипоксии. Малая численность бентосных фораминифер указывает на недостаточное обновление придонных вод, которое может быть дополнительным фактором лучшей сохранности органического вещества. В колонках, отобранных в Гданьской впадине, только самые верхние интервалы представлены слоистыми отложениями, сформированными в условиях гипоксии.

В отличие от СКО, отложения, соответствующие СП, демонстрируют низкое содержание раковин *Elphidium (Cribroelphidium) spp.*, отражающее умеренную активность затоков, как и во время МЛП (рис. 7). Исключением являются отложения Арконского бассейна (рис. 7), в которых концентрации бентосных фораминифер были даже выше, чем во время СКО. Учитывая близость бассейна к Датским проливам, очень высокие значения параметров  $SS$  по всему осадочному разрезу, отражающие активную гидродинамическую обстановку, указывают на постоянное влияние интрузий соленых вод. Вероятнее всего, большая часть данных затоков не достигает удаленных глубоководных бассейнов ввиду их малой интенсивности (малого объема) и бароклинного характера. В пределах СП преимущественно отрицательный индекс САК (Trouet et al., 2009; Olsen et al., 2012) ответственен за меньшую повторяемость западных ветров и затоков. В осадках колонок Западной Балтики в распределении фораминифер отчетливо виден нисходящий тренд, на фоне которого заметна периодичность затоков, также выявленная по данным реанализа (Mohrholz, 2018).

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В результате исследования поверхностных донных осадков юго-восточной части Балтийского моря определена связь условий осадконакопления и распространения родов бентосных фораминифер. Показано, что соленость, следовательно, частота и объем затоков, является основным фактором, лимитирующим распространение карбонатных особей в юго-восточной части Балтийского моря. Решающую роль в распределении агглютинированных фораминифер играют гранулометрический состав осадков и содержание в них органического углерода. Выявленная зависимость была положена в основу применения распределения бентосных фораминифер в колонках донных отложений как индикатора условий осадконакопления. По данным комплексного анализа осадочного разреза, сформированного в Готландском бассейне, реконструированы условия осадконакопления во время литориновой и постлиториновой стадий и установлена взаимосвязь между интенсивностью затоков и вариациями индекса САК на больших временных масштабах. Содержание  $OV$  в отложениях увеличивалось в теплые периоды, отражая увеличение первичной продукции в результате повышения температуры поверхности моря. Несмотря на расположение исследуемого участка ниже галоклина, по данным реконструкции, в теплые периоды признаки гипоксии не выявлены, что может свидетельствовать о вентиляции вод внутривпадинными интрузиями из Слупского желоба. Присутствие раковин *Elphidium (Cribroelphidium) spp.* в осадочном разрезе около 6.9 тыс. кал. л. н. отражает наличие солоноватоводных условий. Во время ГКО не было выявлено заметного влияния затоков. Относительное увеличение солености придонных вод реконструировано в интервалах 5.3–4.8 и 3.9–3.4 тыс. кал. л. н. Выраженное влияние затоков

реконструировано во время РКО (2.1–1.6 тыс. кал. л. н.). В данные периоды преобладала положительная фаза САК, обуславливая преобладание западных ветров и поступление вод Северного моря. Для интервала СКО отмечены низкие концентрации бентосных фораминифер наряду с резко положительным индексом САК, обусловившим аномально сильные западные ветры. Влияние последних было скомпенсировано градиентом давления, препятствовавшим распространению североморской воды в удаленные центральный и восточный районы моря. Изменение фазы САК с положительной на преимущественно отрицательную во время МЛП привело к ослаблению западных ветров и снижению активности затоков во время МЛП и СП.

На основе комплексного анализа пяти коротких колонок реконструированы условия осадконакопления относительно влияния затоков североморских вод в западной и юго-восточной части Балтийского моря в течение последнего тысячелетия. В Гданьском бассейне на осадконакопление оказала сильное влияние локальная топография. Так, на Гданьско-Готландском пороге коротким осадочным разрезом были вскрыты плотные анциловые глины. Вышележащие слои были представлены литориновыми и постлиториновыми осадками. Первичный заток соленых вод на Гданьско-Готландском пороге реконструирован 7.7 тыс. кал. л. н. Изученные отложения охватывают два сопоставимо теплых периода — СКО и СП, — в течение которых содержание органического вещества демонстрирует относительное увеличение в результате повышения продуктивности поверхностных вод. Отложения Гданьской впадины характеризовались общим высоким содержанием органического вещества в результате сочетания более высокого поступления материала из-за близости побережья и лучшей сохранности органики ввиду спокойных гидродинамических условий. Продукция диатомовых водорослей, как правило, была выше в периоды, характеризовавшиеся более холодными условиями (ТВ и МЛП), а также во время СП. Отсутствие слоистых интервалов в осадках западной Балтики, накопленных во время теплых периодов (СКО и СП), отражает вентиляцию придонного слоя водами затоков. Во время СКО существенное увеличение численности бентосных фораминифер в осадках не только Западной Балтики, но и значительно восточнее расположенной Гданьской впадины указывает на поступление вод повышенной солености. Положительный индекс САК в этот период обусловил преобладание западных ветров, способствующих поступлению североморских вод в Балтийское море. В интервалах ТВ, МЛП и СП реконструировано незначительное повышение солености придонных вод, не затрагивающее восточную часть моря. Это совпадало с отрицательной фазой САК, и, следовательно, ослаблением западных ветров и низкой повторяемостью затоков. В Арконском бассейне умеренная (во время ТВ) и выраженная (во время СП) интенсификация затоков отражает также региональное влияние североморских вод ввиду близости Датских проливов.

Таким образом, использование родов-индикаторов бентосных фораминифер, несмотря на крайне высокую степень растворения карбонатного материала, а также изначально низкие концентрации раковин, позволило применить микропалеонтологический анализ в качестве инструмента для реконструкции условий осадконакопления. Выполненный анализ позволяет сделать вывод о связи интенсивности затоков вод Северного моря с изменениями индекса САК на различных временных интервалах.

### **Список работ, опубликованных автором по теме диссертации**

**Статьи, входящие в «Перечень рецензируемых научных изданий, в которых должны быть опубликованы основные научные результаты диссертаций на соискание ученой степени кандидата наук, на соискание ученой степени доктора наук», а также в МНБД**

1. **Романенко, Е.Р.** Palaeoecological conditions in the south-eastern and western Baltic Sea during the last millennium / Е.Р. Ponomarenko, Т.Л. Pugacheva, L.A. Kuleshova // Quaternary. – 2024. – V. 7(4). 44. (категория К1) (2.4 п.л/ 1.2 п.л)



2. **Ponomarenko, E.P.** Holocene palaeoenvironment of the central Baltic Sea based on sediment records from the Gotland Basin / E.P. Ponomarenko // *Regional Studies in Marine Science*. – 2023. – 102992. (**категория K1**) (1.6 п.л)
3. **Ponomarenko, E.** Environmental factors affecting recent benthic foraminiferal distribution in the south-eastern Baltic Sea / E. Ponomarenko, V. Krechik, E. Dorokhova // *Baltica*. – 2020. – V. 33. – № 1. – P. 58–70. doi:10.5200/baltica.2020.1.6. (**категория K1**) (1.5 п.л/ 0.5 п.л)
4. **Пономаренко, Е.П.** Комплексные исследования в 44-м рейсе научно-исследовательского судна «Академик Борис Петров» / А.В. Крек, В.Т. Пака, Е.В. Крек, Е.Е. Ежова, Д.В. Дорохов, А.А. Кондрашов, Е.С. Бубнова, Е.П. Пономаренко, Л.Д. Баширова, М.В. Капустина // *Океанология*. – 2019. – Т. 59 (5). – С. 888–890. (**категория K2**) (0.5 п.л/ 0.05 п.л)
5. **Ponomarenko, E.P.** Benthic foraminifera distribution in the modern sediments of the south-eastern part of the Baltic Sea with respect to North Sea water inflows / E.P. Ponomarenko, V.A. Krechik // *Russian Journal of Earth Sciences*. – 2018. – Vol. 18. – № 6. doi:10.2205/2018ES000632. (**категория K2**) (0.8 п.л/ 0.4 п.л)

#### Статьи в рецензируемых научных журналах по смежным специальностям

6. **Пономаренко, Е.П.** Палеоэкологические условия Гданьского бассейна в голоцене по данным комплексного анализа коротких седиментационных колонок / Е.П. Пономаренко, Л.А. Кулешова // *Вестник БФУ им. И. Канта. Сер.: Естественные и медицинские науки*. – 2020. – № 4. – С. 69–82. (1.2 п.л/ 0.6 п.л)

#### Материалы конференций

7. **Пономаренко, Е.П.** Определение локального резервуарного эффекта при датировании осадков Балтийского моря / Т.Л. Пугачева, Е.П. Пономаренко // *Материалы XXIV Международной научной конференции (Школы) по морской геологии*, г. Москва, 2021 г. – Москва: Институт океанологии им. П.П. Ширшова РАН. – Т 1. – С. 144–148. (0.6 п.л/ 0.3 п.л)
8. **Пономаренко, Е.П.** Геохронология донных отложений юго-восточной части Балтийского моря: подходы и проблемы / Т.Л. Пугачева, Е.П. Пономаренко // *Комплексные исследования Мирового океана. Материалы VI Всероссийской научной конференции молодых ученых*, г. Москва, 18–24 апреля 2021 г. – Москва: Институт океанологии им. П.П. Ширшова РАН. – С. 402–404. DOI:10.29006/978-5-6045110-3-9. (0.4 п.л/ 0.2 п.л)
9. **Пономаренко, Е.П.** Реконструкция условий Гданьского бассейна в позднем голоцене по новым данным изучения седиментационных колонок / Е.П. Пономаренко, Л.А. Кулешова // *Комплексные исследования Мирового океана. Материалы VI Всероссийской научной конференции молодых ученых*, г. Москва, 18–24 апреля 2021 г. – Москва: Институт океанологии им. П.П. Ширшова РАН. – С. 396–398. DOI:10.29006/978-5-6045110-3-9. (0.4 п.л/ 0.2 п.л)
10. **Пономаренко, Е.П.** Палеоэкологические условия Гданьского бассейна в позднем голоцене по данным изучения седиментационных колонок / Е.П. Пономаренко // *Комплексные исследования Мирового океана. Материалы V Всероссийской научной конференции молодых ученых*, г. Калининград, 18–22 мая 2020 г. – Калининград: АО ИО РАН. – С. 344–346. (0.4 п.л)
11. **Ponomarenko, E.P.** Variability of saline water inflow into the Gotland Basin (Central Baltic Sea) based on benthic foraminifera record / E.P. Ponomarenko // *European Geoscience Union General Assembly 2019: Geophysical Research Abstracts*. Vienna, Austria. – 2019. – V.21. – EGU2019-1247. (0.06 п.л)
12. **Ponomarenko, E.P.** Holocene paleoenvironment of the Central Baltic Sea based on benthic foraminifera record from the Gotland Basin / E.P. Ponomarenko // *International Field Symposium of the Peribaltic Working Group: Scientific Technical Report*. Greifswald, Germany. – September 2019. – STR19/01. – P. 84-85. DOI: 10.2312/GFZ.b103-19012. (0.2 п.л)
13. **Ponomarenko, E.P.** Benthic foraminifera distribution in the surface sediments of the Baltic Sea in relation to the saline water inflows / E.P. Ponomarenko, V.A. Krechik, E.V. Dorokhova // *14th Colloquium on Baltic Sea Marine Geology*, 2018. – Huddinge, Sweden. – P. 58. (0.1 п.л/ 0.03 п.л)
14. **Ponomarenko, E.P.** Benthic foraminifera distribution in the South-Eastern Baltic Sea in relation to the North Sea Water Inflow / E.P. Ponomarenko, E.V. Dorokhova, V.A. Krechik // *2<sup>nd</sup> Baltic*

Earth Conference The Baltic Sea Region in Transition 2018. – Helsingor, Denmark. – P. 31. (0.1 п.л/ 0.03 п.л)

15. **Пономаренко, Е.П.** Распределение бентосных фораминифер в поверхностном слое донных осадков Балтийского моря как индикатор затоков североморских вод / Е.П. Пономаренко, В.А. Кречик // Геология морей и океанов: Материалы XXII Международной научной конференции (Школы) по морской геологии. – Москва: ГЕОС, 2017. – Т.1. – С. 223 – 228. (0.7 п.л/ 0.35 п.л)

16. **Пономаренко, Е.П.** Распределение фораминифер в поверхностном слое донных осадков Юго-Восточной части Балтийского моря / Е.П. Пономаренко, В.А. Кречик // Комплексные исследования Мирового океана. Материалы II Всероссийской научной конференции молодых ученых. [Электронный ресурс]. – М: ИО РАН, 2017. – С. 506–507. (0.2 п.л/ 0.1 п.л)

17. **Ponomarenko, E.P.** Benthic foraminiferal distribution in the Baltic Sea as indicator of the North Atlantic water inflow / E.P. Ponomarenko, V.A. Krechik // European Geoscience Union General Assembly 2017: Geophysical Research Abstracts. – Vol. 19. – EGU 2017-840, 2017. (0.06 п.л)