

РЕКОНСТРУКЦИЯ УСЛОВИЙ СРЕДЫ ЮГО-ВОСТОЧНОЙ ЧАСТИ БАЛТИЙСКОГО МОРЯ В ТЕЧЕНИЕ ПОСЛЕДНЕГО ТЫСЯЧЕЛЕТИЯ

Е. П. Пономаренко^{1,2}, А. А. Акманова³, В. Д. Шорохова⁴, А. О. Копышова⁵

¹ Институт океанологии им. П. П. Ширшова РАН,
Россия, 117997, Москва, Нахимовский проспект, д. 36,
e-mail: ponomarenko.katharina@gmail.com;

² Балтийский федеральный университет им. И. Канта,
Россия, 236041, Калининград, ул. Александра Невского, д. 14;

³ Воронежский Государственный Университет,
Россия, 394018, Воронеж, пл. Университетская, д. 1,
e-mail: Sanyabuld@yandex.ru;

⁴ МАОУ «СОШ № 24»,
Россия, 236016, Калининград, ул. Пионерская, д. 9,
e-mail: varya.shorokhova@bk.ru;

⁵ АНОО «Физтех-лицей» им. П. Л. Капицы,
Россия, 141700, Долгопрудный, ул. Летная, д. 7,
e-mail: antoninakopyshova@gmail.com

Палеоэкологические условия Балтийского моря в течение последних ~1000 лет реконструированы на основе геохимических и литологических исследований трех коротких колонок донных осадков, отобранных с помощью герметичной малой трубы в Гданьском бассейне и на склоне Готландской впадины. В течение двух теплых климатических периодов – средневекового климатического оптимума и современного потепления, отличающихся повышенной поверхностной продуктивностью, – кислородный режим придонных вод различался. Во время средневекового климатического оптимума, при более низкой, чем сейчас, антропогенной нагрузке, естественные климатические вариации имели значительное влияние на экосистему бассейна. Частые затоки насыщенных кислородом североморских вод предотвращали развитие гипоксии в придонном слое. При современном потеплении ускорение эвтрофикации из-за поступления в избыток питательных веществ антропогенного происхождения на фоне снижения частоты и объема вод затоков привело к развитию обширной гипоксии. В более холодный малый ледниковый период снижение продуктивности, несмотря на уменьшение количества затоков, обусловило достаточное насыщение кислородом придонного слоя воды.

Ключевые слова: рентгенофлуоресцентный анализ, короткие колонки осадков, средневековый климатический оптимум, современное потепление, гипоксия, эвтрофикация

Введение

Балтийское море, ввиду внутриконтинентального положения и ограниченного водообмена, характеризуется низкой скоростью природных процессов самоочищения. Растущая антропогенная нагрузка и современные изменения климата (Kabel et al., 2012)

оказывают выраженное негативное влияние на состояние придонных экосистем (Zillén et al., 2008). Ключевым условием устойчивого управления регионом становится изучение прошлых климатических обстановок, являющихся фоном для исследования современной динамики условий окружающей среды. Сопоставимым с современным потеплением (СП) климатическим режимом является средневековый климатический оптимум (СКО), во время которого температура воздуха была на 0.5 градуса выше современной (Reckermann et al., 2014). Источником данных о прошлых экологических обстановках служат результаты комплексных исследований колонок донных осадков. К тому же для изучения недавних (в масштабах столетий) изменений среды необходимо исследование колонок донных осадков с ненарушенным верхним слоем. Для Балтийского моря такие работы крайне немногочисленны и в основном выполнены в центральном и западном районах моря. Так, в реконструкции условий в Готландском бассейне в течение последнего тысячелетия (Kabel et al., 2012) рассмотрены только такие условия осадконакопления, как первичная продуктивность и вариации температуры поверхностного слоя воды. Однако в упомянутом исследовании не рассмотрены придонная гидродинамика, а также изменения метеорологических параметров, являющиеся ведущими факторами, влияющими на изменение условий среды. Подробная реконструкция условий среды в течение последнего тысячелетия в Гданьском бассейне выполнена только в работах Пономаренко и Кулешовой (2020) и Ponomarenko et al. (2024). Несмотря на исследование колонок с ненарушенным верхним слоем, ввиду ограниченного объема материала, авторам не удалось проанализировать верхние 5 см осадка и, следовательно, рассмотреть недавние изменения среды во время СП. Таким образом, не было выполнено сравнение условий СКО и последних изменений климата, которое бы позволило оценить влияние природной и антропогенной составляющих на данный процесс.

Настоящее исследование направлено на реконструкцию условий среды юго-восточной части Балтийского моря в течение последнего тысячелетия, в рамках которого выделяют: СКО – 1000–600 календарных лет назад (к.л.н.); малый ледниковый период (МЛП) – 600–100 к.л.н.; СП – 100 к.л.н. по настоящее время (Jilbert, Slomp, 2013; Binczewska et al., 2018). По данным геохимических и литологических исследований трех колонок донных осадков с ненарушенным верхним слоем будут реконструированы поверхностная продуктивность, гидродинамика и кислородный режим в придонном слое воды. Цель работы – оценить совместное влияние затоков североморских вод, естественной динамики климата и антропогенной нагрузки на придонные условия осадконакопления во время двух сопоставимо теплых периодов, СКО и СП, в контексте изменения североатлантического колебания.

Район исследования

Гданьский бассейн расположен в юго-восточной части Балтийского моря и отделен Гданьско-Готландским порогом (максимальной глубиной 86 м) от Готландского бассейна. Гданьский бассейн отличается сравнительно небольшой глубиной:

средняя составляет около 40 м, а максимальная достигает 114 м в районе Гданьской впадины (Emelyanov, 2002). Позднечетвертичные отложения включают три основных литостратиграфических комплекса: моренные и ленточные глины, сформировавшиеся в условиях Балтийского ледникового озера; глинистые отложения, связанные с Иольдиевым морем и Анциловым озером; постледниковые илистые осадки, характерные для Литоринового и Постлиторинового морей (Winterhalter, 1992; Блажчишин, 1998; Амантов и др., 2010). Максимальное содержание органического углерода (5–11 %) отмечено в глубоководных илах, а илистый и песчаный материал, покрывающий моренные отложения, характеризуется более низким содержанием органики (Блажчишин, 1998; Emelyanov, 2002). Водная толща бассейна представлена поверхностным (активным) и глубинным слоями, разделенными на отметке 70–75 м устойчивым галоклином, препятствующим вертикальному водообмену (Emelyanov, 2002). Таким образом, гидрохимический режим изолированного придонного слоя воды определяется воздействием соленых, насыщенных кислородом североморских вод (Leppäranta et al., 2009). Замедленный водообмен в сочетании с высоким поступлением органического вещества в донные осадки способствует частому развитию гипоксии и даже аноксии, а также накоплению сероводорода в придонных водах (Блажчишин, 1998; Emelyanov, 2002).

Материалы и методы

В 68-м рейсе ПС «Академик Иоффе» отобраны три колонки донных отложений с помощью герметичной гравитационной трубы (Трусова и др., 2025). Конструкция трубы позволяет получать осадок с ненарушенным верхним слоем, что является необходимым условием при исследовании современного осадконакопления (Laskina et al., 2024). Две колонки отобраны в Гданьской впадине на глубинах 99 м (АИ-68019) и 87 м (АИ-68020); одна колонка получена на склоне Готландской впадины на глубине 101.5 м (АИ-68010) (рисунок 1) (Трусова и др., 2025). Непосредственно после отбора проведено подробное литологическое описание осадков с использованием шкалы цветности (Munsell Soil Color Chart).

Рентгенофлуоресцентный анализ для определения концентраций химических элементов в ppm (S, Mn, Ti, Fe, Si, Zr, Rb, Pb) в осадках выполнен на борту судна с использованием спектрометра (Vanta-C OLYMPUS). Данный метод позволяет быстро и качественно получить высокоразрешающие данные о концентрации химических элементов, которые служат ценными прокси-индикаторами для реконструкции условий осадконакопления. Влажные осадки были помещены в пластиковые тигли; измерения проведены с шагом 1 см в режиме “GeoChem2”, время одного измерения – 180 секунд. Пересчет концентрации элементов на сухой вес осадка проведен по модифицированному методу (Laskina et al., 2024). Концентрации и отношения элементов использованы в качестве индикаторов изменения параметров среды в прошлом (Croudace, Rothwell, 2015):

Mn/Fe – изменение окислительно-восстановительных условий. Mn мобилизуется в бескислородных условиях, «отделяется» от Fe во время диагенеза, диффундирует по градиенту концентрации и заново осаждается на новой кислородной/бескислородной границе (Marsh et al., 2007).

Zr/Rb – изменение размерности частиц осадков. Rb адсорбируется, в основном, на тонкозернистых глинистых минералах, тогда как Zr содержится в более крупных теригенных фракциях. Более высокое отношение Zr/Rb интерпретировано как показатель увеличения размерности осадков и, следовательно, энергии осадконакопления (повышения интенсивности придонных течений), так как более сильные течения переносят более крупнозернистые осадки (Rothwell et al., 2006).

Si/Ti – изменение содержания биогенного кремния, в основном, связанное с обилием створок диатомовых водорослей. Так как распределение Si может отражать не только биогенную составляющую, но и минеральную, необходимо нормализовать его концентрации, разделив их на Ti, содержащийся в терригенном обломочном материале (Marsh et al., 2007). В таком случае пики в распределении отношения будут отражать избыток Si, обусловленный присутствием створок диатомовых.

S – изменение содержания органического вещества в осадках. S тесно связана с органическим веществом, так как содержится в морских растениях, а минерализованная S – в их мертвых остатках. В отложениях органическая S сохраняется в виде сульфата или сульфида посредством бактериального восстановления (Ivanov, 1981).

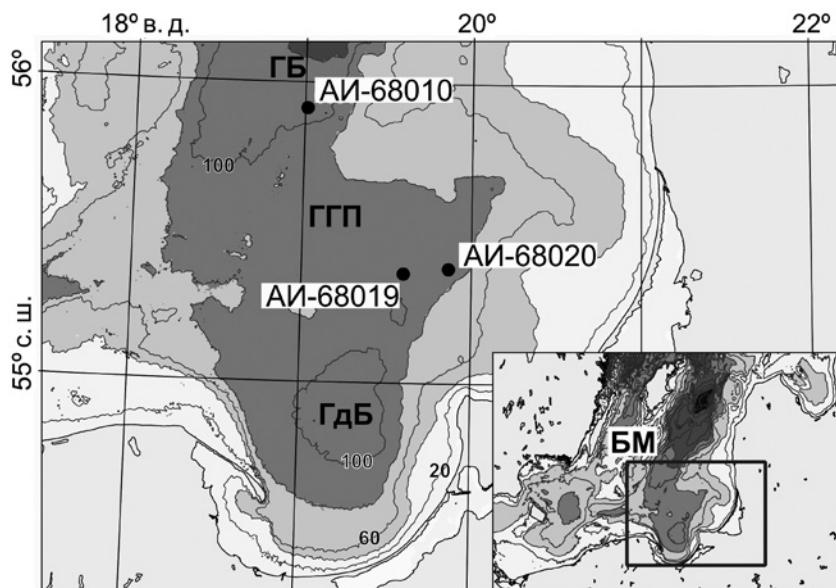


Рис. 1 – Карта-схема района исследования с указанием местоположения станций отбора колонок донных осадков. Сокращения: ГБ – Готландский бассейн; ГГП – Гданьско-Готландский порог; ГдБ – Гданьский бассейн; БМ – Балтийское море

Оценка потерь при прокаливании (ППП) проведена с разрешением 1 см. Перед анализом влажные осадки высушивали при 90 °C и измельчали в порошок, затем снова высушивали и помещали в эксикатор для защиты материала от влаги.

ППП определяли путем озоления 1 грамма осадков при 550 °C в течение более 3 часов (до достижения постоянного веса) и расчета полученной разницы масс (Ponomarenko et al., 2024). Для осадков Балтийского моря значения ППП дают оценку общего содержания органического вещества (Leipe et al., 2011), которое будет интерпретировано как показатель изменения поверхностной продуктивности.

Оценка возраста осадков основана на изменении концентраций Pb в ppm вдоль осадочных колонок (например, Renberg et al., 1994; Zillén et al., 2012). Ввиду существенного завышения возраста поверхностных (до 1 м глубины) осадков Балтийского моря при выполнении радиоуглеродных датировок, относительное датирование материала по данным распределения Pb является более надежным методом (Zillén et al., 2012; Häusler et al., 2016). Историческим пикам концентрации Pb, возникшим в результате антропогенного загрязнения, присвоены точные календарные возрасты: средневековое загрязнение 750 к.л.н.; и современное загрязнение 1970-е гг. (–20 к.л.н.) (Zillén et al., 2012). Однако распределение Pb не всегда равномерно от керна к керну, и описанные выше пики не всегда однозначно выделяются. Тем не менее, как было показано в исследовании (Renberg et al., 1994), примерно 1000 к.л.н. произошло значительное и резкое увеличение концентрации Pb в отложениях, после чего концентрации никогда не возвращались к уровням, близким к фоновым. В этом исследовании, по аналогии с работой (Ponomarenko et al., 2024), мы интерпретировали резкое и непрерывное увеличение концентрации Pb как точку отсчета для 1000 к.л.н. Ненарушенному слою поверхностных осадков присвоен год отбора колонок – 2024 (–74 к.л.н.).

Результаты

По данным распределения свинца вдоль колонок (рисунок 2) в верхних интервалах осадков был выделен пик современного загрязнения 1970-е (–20 к.л.н.): 43 ppm на глубине 2–3 см в колонке АИ-68010, 86 ppm на глубине 6–7 см в колонке АИ-68019, 86 ppm на глубине 9–10 см в колонке АИ-68020 (Трусова и др., 2025). Пик средневекового загрязнения (750 к.л.н.) прослеживался только в колонке АИ-68010 на глубине 13–14 см (54 ppm). Вероятное начало средневекового загрязнения (ок. 1000 к.л.н.) отмечено в двух колонках: АИ-68019 (21 ppm, 40–41 см) и АИ-68020 (27 ppm, 56–57 см) (Трусова и др., 2025).

В колонке АИ-68010 длиной 55 см можно выделить три слоя в соответствии с изменением литологических и геохимических характеристик (рисунки 2 и 3). Верхний (0–1 см) слоистый интервал оливкового и черного илов характеризуется максимальными значениями отношений Si/Ti и Mn/Fe, а также наибольшими величинами ППП (27 %) и концентрации S (16*1000 ppm) (рисунок 3). Отношение Zr/Rb демонстрирует умеренные значения на фоне в общем высоких значений по всей длине колонки по сравнению с другими исследованными колонками (рисунок 3). В нижележащем интервале (1–38 см) оливково-серого и темно-серого ила,

отделенном снизу косой границей (34–38 см), отношения Si/Ti и Mn/Fe изменяются мало. Показатель ППП и концентрация S повышенны в интервале 3–6 (16–22 % и 10–11*1000 ppm, соответственно) см. Концентрация S характеризуется высокими значениями в интервале 18–38 см, одновременно с умеренным повышением значений Si/Ti. В интервале 32–38 см соотношение Zr/Rb характеризуется максимальными значениями, по сравнению со всеми исследуемыми колонками. В данном интервале также обнаружены включения дресвы, песка и отдельных зерен кварца, тогда как значения ППП значительно снижаются (4–7 %). Нижний интервал (38–55 см) глин серого цвета характеризуется стабильно пониженными значениями соотношений Si/Ti, Mn/Fe и Zr/Rb, а также низкими значениями ППП (5–8 %) и концентрации S (3–10*1000 ppm). В интервале 45–46 см данные распределения элементов отсутствуют в связи с технической ошибкой измерения. В слое 49–55 см найдены включения дресвы.

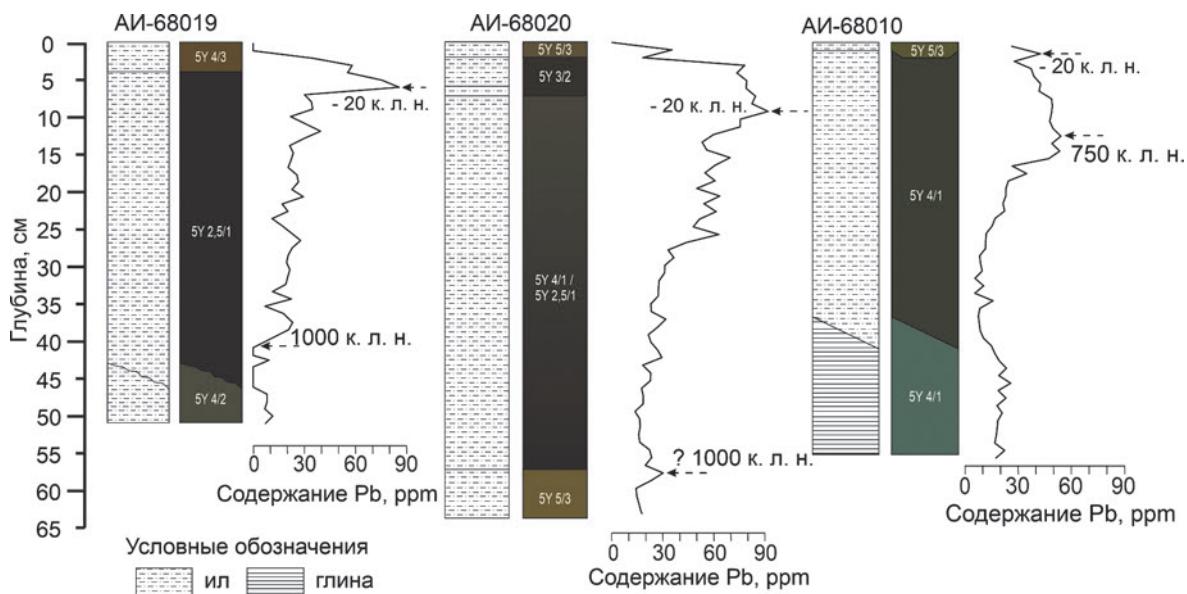


Рис. 2 – Литологическая характеристика колонок осадков и распределение концентраций свинца вдоль разрезов. Цвета осадков указаны кодами в соответствии со шкалой Munsell Soil Color

Колонка АИ-68019 длиной 53 см разделена на три слоя. Верхний слой (0–4 см), сложенный слоистыми илами оливкового и насыщенно темно-серого цветов (рисунок 2), характеризуется очень высокими значениями соотношения Si/Ti, а также высокими значениями ППП (18–36 %) и концентрации S (11–22*1000 ppm) и соотношения Mn/Fe (рисунок 4). Соотношение Zr/Rb отличается самыми низкими значениями для колонки (рисунок 4). В слое (4–46.5 см) однородного черного ила, отделенного косой границей (43–46.5 см) от нижележащих осадков, показатели ППП и концентрации S повышенны (18–25 % и 11–19*1000 ppm) в интервале 34–46 см, одновременно с высокими значениями Si/Ti. В распределении Mn/Fe можно отметить три пика: 27–28, 32–33 и 44–45 см. Соотношение Zr/Rb по всей длине интервала демонстрирует

стабильные значения. В интервале (46.5–53 см) оливково-серого ила снижаются соотношение Si/Ti, величина ППП (17–21 %) и концентрация S (9–12*1000 ppm). Соотношения Mn/Fe и Zr/Rb отличаются стабильно низкими значениями.

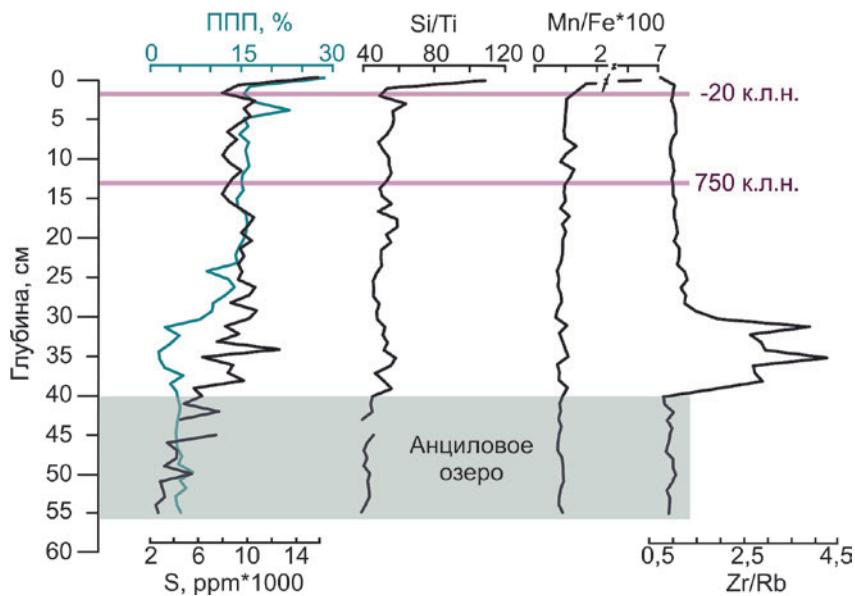


Рис. 3 – Распределение концентраций и соотношения элементов и величины потерь при прокаливании (ППП) вдоль колонки АИ-68010, отобранный на склоне Готландской впадины. Горизонтальными розовыми линиями обозначены датировки

В колонке АИ-68020 (длина 64 см) можно выделить четыре слоя, в верхнем из которых (0–2 см), представленном тонкими слоями оливкового и черного илов (рисунок 2), повышены значения соотношений Si/Ti и Mn/Fe, а также величина ППП (24–29 %) и концентрация S (12–31*1000 ppm) (рисунок 4). Значение соотношения Zr/Rb понижено. Нижележащий интервал (2–7 см) средней слоистости темного оливково-серого и оливкового ила характеризуется снижением всех показателей, за исключением соотношения Zr/Rb, которое отличают высокие значения (рисунок 4). На всем протяжении следующего интервала (7–57 см) темно-серого ила значение ППП и концентрация S понижены, за исключением повышения показателей (18–20 % и 12–15*1000 ppm) в верхней части (9–13 см) и роста значений (16–27 % и 9–11*1000 ppm) в интервале 45–57 см. В связи с ошибкой измерения значения ППП для интервала 45–46 см было решено не использовать для анализа и интерпретации (рисунок 4). Значения соотношения Si/Ti изменяются пилообразно, плавно снижаясь вниз по разрезу, исключая интервал повышенных значений на глубине 45–51 см. Повышение значений Mn/Fe отмечено в интервалах 25–32 и 42–49 см. Показатель Zr/Rb демонстрирует высокие значения в интервале 7–25 и 40–57 см. Нижний слой (57–64 см) ила оливкового цвета характеризуется все еще высокими значениями Zr/Rb, умерено повышенными значениями ППП (17–19 %) и концентрацией S (8–12*1000 ppm) и фоновыми значениями Si/Ti и Mn/Fe.

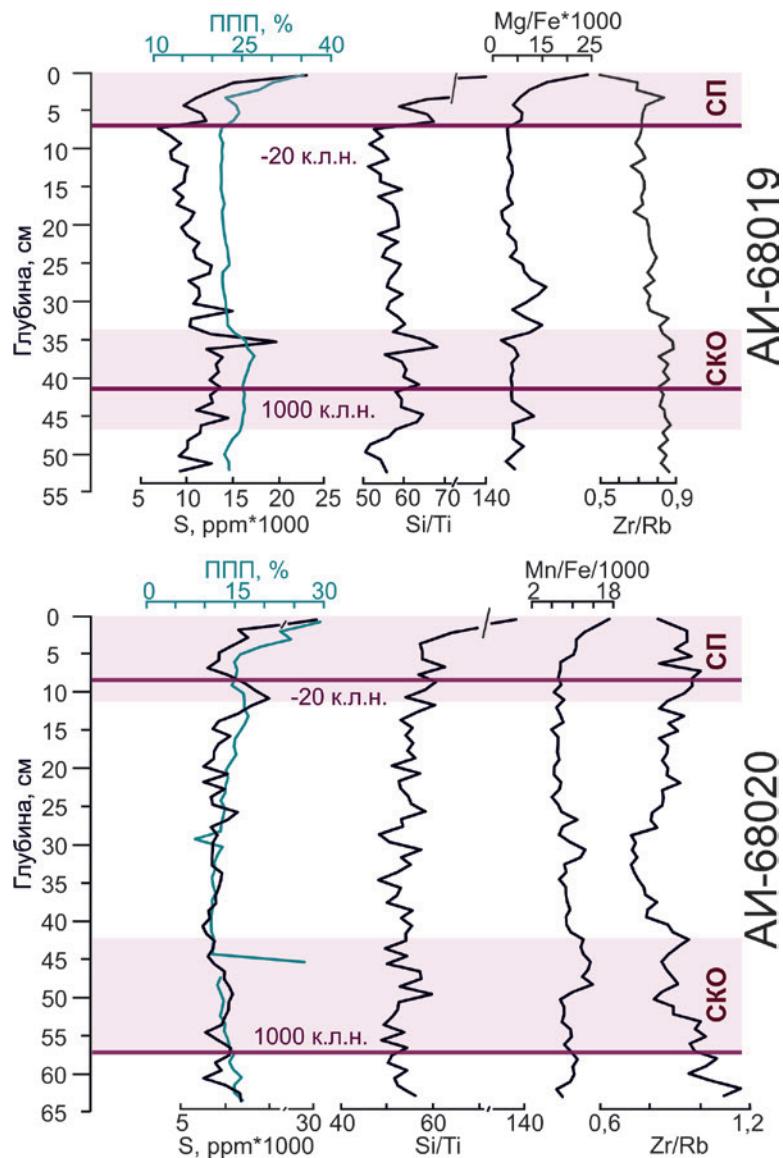


Рис. 4 – Распределение концентраций и соотношения элементов и величины потерь при прокаливании вдоль колонок, отобранных в Гданьской впадине. Горизонтальными розовыми линиями обозначены датировки, розовой заливкой обозначены периоды потепления. Сокращения: СП – современное потепление; СКО – средневековый климатический оптимум; ППП – потери при прокаливании

Обсуждение результатов

Колонка, отобранная на склоне Готландской впадины (АИ-68010), в нижней части характеризуется присутствием интервала серых глин, сформировавшегося предположительно во время пресноводной олиготрофной стадии Анцилового озера (Блажчишин, 1998; Emelyanov, 2002). На пониженную первичную продукцию, ввиду более холодного климата, указывают низкое содержание органического вещества и биогенного кремнезема.

Выявленные в нижней части вышележащих осадков, соответствующих литориновой стадии, резкое укрупнение размерности частиц по данным Zr/Rb, а также наличие крупнозернистых включений в осадках, указывают на высокодинамичные гидрологические условия, вероятно, связанные с литориновой трансгрессией (Harff et al., 2011). Одновременное увеличение содержания органического вещества (по данным распределения S) и продукции диатомовых отражают потепление климата во время начала ГКО. Сниженные значения ППП в начале интервала обусловлены наличием большого количества крупнозернистого минерального материала. Вероятнее всего, активные присклоновые гидро- и литодинамика обусловили очень низкие скорости осадконакопления в литориновое и постлиториновое время в колонке АИ-68010, поэтому дальнейшая более подробная реконструкция условий последних 8000 к.л. не представляется возможной.

Средневековый климатический оптимум (СКО)

По данным распределения геохимических характеристик осадков период СКО возможно отчетливо выделить только в колонке АИ-68019, отобранный в Гданьской впадине (рисунок 3). В осадках склона Готландской впадины (АИ-68010) идентификацию затрудняет низкое разрешение данных, а в колонке АИ-68020 – относительно небольшие изменения параметров, что может указывать на частичное переотложение или размытие осадков на присклоновом участке отбора колонки. Высокий показатель содержания грубой фракции в нижней части колонки АИ-68020, соответствующей периоду СКО, подтверждает активную придонную динамику в данное время.

В осадках, накопленных во время СКО, повышение содержания органического вещества и биогенного кремния указывает на более высокую поверхностную продуктивность по сравнению с холодными интервалами. Как следует из высоких соотношений Si/Ti, теплый климат во время СКО (Reckermann et al., 2014) и, соответственно, более высокие температуры воды поверхностного слоя моря способствовали усиленному цветению диатомовых водорослей, обычно имеющих конкурентное преимущество в периоды похолодания (Wasmund et al., 1998). Возможным объяснением может быть значительное увеличение концентраций питательных веществ, способствующее общей интенсификации продукции.

В более теплые периоды расходование кислорода в придонном слое на окисление интенсивного потока органики приводит к развитию гипоксии (Zillén et al., 2008; Kabel et al., 2012). Однако характерные для условий гипоксии пачки слоистых осадков, отмечаемые исследователями в других районах Балтийского моря во время СКО (Zillén et al., 2008; Häusler et al., 2016), в осадках Гданьского бассейна и склона Готландской впадины не найдены. Повышенные значения соотношения Mn/Fe и отдельные небольшие пики, зарегистрированные в осадках Гданьского бассейна, отражают смену окислительно-восстановительных условий. Возможным объяснением повышения соотношения Mn/Fe может быть очень кратковременное присутствие условий

гипоксии, либо миграция марганца из более глубоких участков бассейнов, затронутых гипоксией во время СКО (Häusler et al., 2016).

В исследуемых осадках в период СКО отмечено увеличение размерности частиц, что свидетельствует об усилении придонной гидродинамики, обусловленной, предположительно, более частыми и интенсивными затоками. По опубликованным данным микропалеонтологического анализа осадков Гданьского бассейна (Пономаренко, Кулешова, 2020; Ponomarenko et al., 2024) реконструировано повышение солености во время СКО, которое также указывает на влияние трансформированных североморских вод. По данным реконструкции (Trouet et al., 2009) в период СКО преобладал положительный индекс североатлантического колебания (САК), во время которого над Балтийским морем доминирует западный перенос, обуславливающий поступление насыщенных кислородом, плотных и соленых североморских вод в Балтийское море. Таким образом, несмотря на повышение поступления органического вещества в донные осадки в условиях более теплого климата СКО, аэрация придонного слоя воды частыми затоками препятствовала развитию гипоксии в Гданьском бассейне.

Малый ледниковый период (МЛП)

Согласно климатическим реконструкциям (Kabel et al., 2012; Reckermann et al., 2014) температура воздуха во время МЛП была на 2–2.5 градуса ниже по сравнению с периодами СКО и СП. Похолодание нашло отражение в снижении первичной продукции и количества органического вещества, поступающего в осадки Гданьского бассейна и склона Готландской впадины. В целом пониженные соотношения Mn/Fe говорят о стабильных окислительно-восстановительных условиях в придонном слое и отсутствии гипоксии (Häusler et al., 2016). Отдельные повышения значений ближе к концу СКО могут быть результатом миграции марганца из более глубоких бескислородных слоев до осаждения на новой границе кислородного и бескислородного слоев.

Уменьшение размерности частиц осадков говорит о снижении придонной гидродинамики и, соответственно, уменьшении роли заток вод Северного моря в формировании условий осадконакопления. Во время МЛП доминировала отрицательная фаза индекса САК (Trouet et al., 2009), блокирующая распространение западных ветров в район Балтийского моря.

Современное потепление (СП)

Осадки всех трех колонок, соответствующие СП, представлены слоистыми илами, накапливающимися в условия гипоксии. На осадконакопление в бескислородных условиях указывают также резкие пики в распределении Mn/Fe во всех трех колонках (Häusler et al., 2016). Гипоксия затронула даже склон Готландской впадины, в общем отличающийся активными придонными гидродинамическими условиями. Слоистые отложения, а также другие маркеры, указывающие на гипоксийные условия, отмечены и в осадках других бассейнов Балтийского моря, соответствующих современному

потеплению (Zillén et al., 2008; Kabel et al., 2012). Последнее говорит об обширном развитии гипоксии во всех бассейнах Балтийского моря в современный период.

В соответствии с реконструкцией (Kabel et al., 2012) во время СП температура поверхностных вод Балтийского моря увеличилась на 2 °C по сравнению с МЛП. Известно, что дополнительное поступление биогенных веществ из антропогенных источников способствует эвтрофикации и перемещению большого количества органического вещества в донные осадки (Jilbert, Slomp, 2013), а увеличение потребления кислорода в придонном слое воды для окисления интенсивно поступающей органики приводит к развитию гипоксии. Таким образом, резкое повышение содержания органического вещества и биогенного кремния в осадках отражает общую интенсификацию первичной продукции в условиях повышения температуры воды.

Минимальное содержание крупнозернистой фракции в осадках СП по сравнению с нижележащими интервалами указывает на снижение придонной динамики ввиду более редких затоков вод из Северного моря. В данный период преобладание отрицательного индекса САК (Trouet et al., 2009) блокировало распространение западных ветров над районом Балтийского моря, что является дополнительным фактором развития гипоксии в придонном слое, ввиду снижения количества затоков насыщенных кислородом вод (Ponomarenko et al., 2024).

Таким образом, широкое распространение зон дефицита кислорода в Гданьском бассейне во время СП, не отмеченное в осадках периода СКО, явилось результатом совместного влияния потепления климата и снижения активности затоков на фоне избыточного поступления питательных веществ из антропогенных источников.

Выводы

Изучение геохимических и литологических характеристик осадков Гданьского бассейна и склона Готландской впадины позволило реконструировать условия осадконакопления последних 1000 к.л., в течение которых можно выделить два сравнимо теплых периода – СКО и СП. Оба периода характеризуются повышенной поверхностной продуктивностью вследствие усиленного «цветения» воды из-за массового развития водорослей в условиях повышения температуры поверхностного слоя воды. Несмотря на увеличение поступления органического вещества в теплые периоды, обычно приводящего к гипоксии, частые затоки североморских вод обеспечивали аэрацию придонного слоя воды и, следовательно, предотвращали развитие дефицита кислорода во время СКО.

В период МЛП наблюдалось похолодание, снижение первичной продукции и уменьшение придонной гидродинамики, что отразилось в стабильных окислительно-восстановительных условиях и отсутствии гипоксии. Уменьшение количества затоков североморских вод во время МЛП было связано с доминированием отрицательной фазы САК, блокирующей западный перенос и, следовательно, поступление плотных и соленых вод в Балтийское море.

Во время СП совместное влияние потепления климата и снижения частоты затоков североморских вод, усугубленное избыточным поступлением питательных веществ антропогенного происхождения, повлияло на широкое распространение гипоксии в Гданьском бассейне, затронувшей в том числе склон Готландской впадины, отличающийся активной гидродинамической обстановкой.

Благодарности. Отбор колонок осадков и интерпретация результатов выполнены в рамках государственного задания Минобрнауки России для ИО РАН (№ FMWE-2024-0025). Геохимические исследования проведены в рамках Всероссийской научно-образовательной программы «Плавучий университет БФУ – профиль Балтики» (соглашение № 075-03-2024-117). Экспедиционные работы выполнены с использованием оборудования уникальной научной установки ПС «Академик Иоффе» в составе ЦКП «Научный флот ИО РАН»

Авторы благодарят Миронову А. Д., Трусову А. М., Лодочникову А. С. и Пугачеву Т. Л. за частичное выполнение геохимических исследований и первичную визуализацию результатов. Авторы выражают благодарность команде ПС «Академик Иоффе» за помощь в получении материалов исследования.

Список литературы

1. Амантов А. В., Амантова М. Г., Бодряков Т. В., Болдырев В. Л., Григорьев А. Г., Дорожов Д. В., Жамойда В. А., Загородных В. А., Кропачев Ю. П., Кунаева Т. А., Ликсущенков С. М., Мануйлов С. Ф., Морозов А. Ф., Морозов Б. Н., Москаленко П. Е., Нестерова Е. Н., Петров О. В., Рябчук Д. В., Сергеев А. Ю., Сивков В. В., Спиридонов М. А., Шахвердов В. А. Атлас геологических и эколого-геологических карт Российского сектора Балтийского моря. 2010. 77 с. ISBN 978-5-93761-165-9. EDN: [QKJKBD](#)
2. Блажчишин А. И. Палеогеография и эволюция позднечетвертичного осадконакопления в Балтийском море. Калининград: Янтарный сказ, 1998. 160 с. https://rusneb.ru/catalog/010003_000061_a56f8e99a71c1529c086d74024addd1f
3. Пономаренко Е. П., Кулешова Л. А. Палеоэкологические условия Гданьского бассейна в голоцене по данным комплексного анализа коротких седиментационных колонок // Вестник Балтийского федерального университета им. И. Канта. Серия: Естественные и медицинские науки. 2020. № 4. С. 69–82. EDN: [XJPJKY](#)
4. Трусова А. М., Миронова А. Д., Шорохова В. Д., Копышова А. О., Акманова А. А., Пономаренко Е. П., Лодочникова А. С. Реконструкция палеоэкологических условий Гданьского бассейна Балтийского моря в позднем голоцене // Труды XIII международной научно-практической конференции «Морские исследования и образование (MARESEDU-2024)». 2025. С. 313–318. EDN: [GTLZPO](#)
5. Binczewska A., Moros M., Polovodova I. A., Sławińska J., Bąk M. 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. 2018. Vol. 47. No. 1. P. 297–310. EDN: [YDFGQX](#). <https://doi.org/10.1111/bor.12267>
6. Croudace I. W., Rothwell R. G. Micro-XRF Studies of Sediment Cores: Applications of a non-destructive tool for the environmental sciences. 2015. 688 p. <https://link.springer.com/book/10.1007/978-94-017-9849-5>

7. Emelyanov E. M. Geology of the Gdansk Basin, Baltic Sea. Kaliningrad, 2002. ISBN 5-7406-0444-3. 494 p. https://rusneb.ru/catalog/002744_000053_RU__%D0%93%D0%9F%D0%9D%D0%A2%D0%91+%D0%A0%D0%BE%D1%81%D1%81%D0%B8%D0%B8__KNB_IBI_S__26.35%28922.0%29__%D0%9560-940527/
8. Häusler K., Moros M., Wacker L., Hammerschmidt L., Dellwig O., Leipe T., Kotilainen A., Arz H. W. Mid-to late Holocene environmental separation of the northern and central Baltic Sea basins in response to differential land uplift // Boreas. 2016. Vol. 46. No. 1. P. 111–128. EDN: YVZFEZ. <https://doi.org/10.1111/bor.12198>
9. Harff J., Endler R., Emelyanov E., Kotov S., Leipe T., Moros M., Olea R., Tomczak M., Witkowski A. Late Quaternary climate variations reflected in Baltic Sea sediments // The Baltic Sea Basin. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg, 2011. P. 99–132. https://doi.org/10.1007/978-3-642-17220-5_5
10. Ivanov M. V. The global biogeochemical sulphur Cycle. In: Likens G. E. (ed) Some perspectives of the major biogeochemical cycles SCOPE. 1981. P. 61–78. https://scope.dge.carnegiescience.edu/SCOPE_17/SCOPE_17_1.4_Chapter4_61-78.pdf
11. Jilbert T., Slomp C. P. Rapid high-amplitude variability in Baltic Sea hypoxia during the Holocene // Geology. 2013. Vol. 41. No. 11. P. 1183–1186. <https://doi.org/10.1130/G34804.1>
12. Kabel K., Moros M., Porsche C., Neumann T., Adolphi F., Andersen T., Siegel H., Gerth M., Leipe T., Jansen E., Damsté J. Impact of climate change on the Baltic Sea ecosystem over the past 1 000 years // Nature climate change. 2012. Vol. 2. P. 871–874. <https://doi.org/10.1038/nclimate1595>
13. Laskina D., Dorokhova E., Koroleva Y. Water content and Pb concentrations in the bottom sediments of the Gdansk Deep (South-Eastern Baltic Sea) according to the portable X-ray fluorescence analyzer Olympus VANTA C. // RJES. 2024. No. 3. P. ES3003. EDN: XVPFOK. <https://doi.org/10.2205/2024ES000879>
14. Leipe T., Tauber F., Vallius H., Virtasalo J., Uścinowicz S., Kowalski N., Nille S., Lindgren S., Myllyvirta T. Particulate organic carbon (POC) in surface sediments of the Baltic Sea // Geo-Marine Lett. 2011. Vol. 31. No. 3. P. 175–188. EDN: OKVCJX. <https://doi.org/10.1007/s00367-010-0223-x>
15. Leppäranta M., Myrberg K. Physical Oceanography of the Baltic Sea // Springer Science & Business Media: New York. NY. USA. 2009. 378 p. <https://link.springer.com/book/10.1007/978-3-540-79703-6>
16. Marsh R., Mills R. A., Green D. R., Salter I. and Taylor S. Controls on sediment geochemistry in the Crozet region // Deep Sea Research. 2007. Vol. 54. Iss. 18–20. P. 2260–2274. <https://doi.org/10.1016/j.dsr2.2007.06.004>
17. Ponomarenko E., Pugacheva T., Kuleshova L. Palaeoecological Conditions in the South-Eastern and Western Baltic Sea during the Last Millennium // Quaternary. 2024. Vol. 7. No. 4. 44 p. EDN: CTVMWO. <https://doi.org/10.3390/quat7040044>
18. Reckermann M., Omstedt A., Pawlak J., Storch H. Climate Change in the Baltic Sea region—What do we know? // Social Dimensions of Climate Change Adaptation in Coastal Regions: Findings from Transdisciplinary Research. 2014. Vol. 5. P. 19–32. <https://publications.hereon.de/id/32017/>
19. Renberg I., Persson M. W., Emteryd O. Pre-industrial atmospheric lead contamination detected in Swedish lake sediments // Nature. 1994. Vol. 368. P. 323–326. <https://doi.org/10.1038/368323A0>
20. Rothwell R. G., Hoogakker B., Thomson J., Croudace I. W. and Frenz M. Turbidite emplacement on the southern Balearic Abyssal Plain (western Mediterranean Sea) during Marine Isotope Stages 1–3: An application of ITRAX XRF scanning of sediment cores to lithostratigraphic

- analysis // Geological Society of London Special Publication. 2006. Vol. 267. No. 1. P. 79–98. <https://doi.org/10.1144/GSL.SP.2006.267.01.06>
21. Trouet V., Espier J., Graham N. E., Baker A., Scourse J. D., Frank D. C. Persistent Positive North Atlantic Oscillation Mode Dominated the Medieval Climate Anomaly // Science. 2009. Vol. 324. Iss. 5923. P. 78–80. <https://doi.org/10.1126/science.1166349>
 22. Wasmund N., Nausch G., Matthäus W. Phytoplankton spring blooms in the southern Baltic Sea—spatio-temporal development and long-term trends // Journal of plankton research. 1998. Vol. 20. No. 6. P. 1099–1117. EDN: YCYWAO. <https://doi.org/10.1093/plankt/20.6.1099>
 23. Winterhalter B. Late-Quaternary stratigraphy of Baltic Sea basins – a review // Bulletin of the Geological Society of Finland. 1992. Vol. 64. Part 2. P. 189–194. <https://doi.org/10.17741/bgsf/64.2.007>
 24. Zillén L., Conley D. J., Andrén T., Andrén E., Björck S. Past occurrences of hypoxia in the Baltic Sea and the role of climate variability, environmental change and human impact // Earth-Sci. Rev. 2008. Vol. 91. No. 1–4. P. 77–92. EDN: MCQDWJ. <https://doi.org/10.1016/j.earscirev.2008.10.001>
 25. Zillén L., Lenz C., Jilbert T. Stable lead (Pb) isotopes and concentrations – A useful independent dating tool for Baltic Sea sediments // Quaternary Geochronology. 2012. Vol. 8. P. 41–45. <https://doi.org/10.1016/j.quageo.2011.11.001>

Статья поступила в редакцию 10.08.2025, одобрена к печати 10.11.2025.

Для цитирования: Пономаренко Е. П., Акманова А. А., Шорохова В. Д., Копышова А. О. Реконструкция условий среды юго-восточной части Балтийского моря в течение последнего тысячелетия // Океанологические исследования. 2025. Т. 53. № 4. С. 159–176. [https://doi.ocean.ru/10.29006/1564-2291.JOR-2025.53\(4\).9](https://doi.ocean.ru/10.29006/1564-2291.JOR-2025.53(4).9)

RECONSTRUCTION OF ENVIRONMENTAL CONDITIONS
IN THE SOUTH-EASTERN PART OF THE BALTIC SEA
OVER THE LAST MILLENNIUM

E. P. Ponomarenko^{1,2}, A. A. Akmanova³, V. D. Shorokhova⁴, A. O. Kopyshova⁵

¹ Shirshov Institute of Oceanology, Russian Academy of Sciences,
36, Nakhimovskiy prospekt, Moscow, 117997, Russia,
e-mail: ponomarenko.katharina@gmail.com;

² Immanuel Kant Baltic Federal University,
14, ul. A. Nevskogo, Kaliningrad, 236041, Russia;

³ Voronezh State University,
1, pl. Universitetskaya, Voronezh, 394018, Russia,
e-mail: Sanyabuld@yandex.ru;

⁴ School No. 24,
9, ul. Pionerskaya, Kaliningrad, 236016, Russia,
e-mail: varya.shorokhova@bk.ru;

⁵ Phystech-Lyceum of Maths and Sciences named after P. L. Kapitsa,
7, ul. Letnaya, Dolgoprudny, 141700, Russia,
e-mail: antoninakopyshova@gmail.com

Paleoecological conditions of the Baltic Sea over the last 1000 ka BP were reconstructed based on geochemical and lithological study of three short sediment cores retrieved using a sealed small corer from the Gdańsk Basin and the slope of the Gotland Basin. It was determined that during two warm climatic periods – the Medieval Climate Anomaly and the Modern Warm Period, characterized by increased surface productivity, the oxygen regime of the bottom waters differed significantly. During the Medieval Climate Anomaly, due to a lower anthropogenic impact, natural climate variations exerted a significant influence on the basin's ecosystem. Furthermore, frequent inflows of oxygen-rich North Sea waters prevented the development of hypoxia in the bottom water. Conversely, during the Modern Warm Period, accelerated eutrophication due to an excess input of nutrients of anthropogenic origin, coupled with a decrease in the frequency and volume of inflow waters, resulted in the development of widespread hypoxia. In the colder Little Ice Age, decreased productivity, despite a reduction in the number of inflows, resulted in sufficient oxygen saturation of the bottom water.

Keywords: X-ray fluorescence (XRF) analysis, short sediment cores, Medieval Climate Anomaly, Modern Warm Period, hypoxia, eutrophication

Acknowledgement: Sediment core retrieval and geochemical analyses were conducted as part of the State Assignment of the Ministry of Science and Higher Education of the Russian Federation for IO RAS (No. FMWE-2024-0025). The interpretation of results was performed within the framework of the All-Russian Scientific and Educational Program “Floating University BFU – Baltic Profile” (Agreement No. 075-03-2024-117). The authors thank A. D. Mironova, A. M. Trusova, A. S. Lodochnikova, and T. L. Pugacheva for partially performing the geochemical analyses and for the initial visualization of the results. The authors express their gratitude to the crew of the R/V “Akademik Ioffe” for their assistance in obtaining the research materials.

References

1. Amantov, A. V., M. G. Amantova, T. V. Bodryakov, V. L. Boldyrev, A. G. Grigoryev, D. V. Dorokhov, V. A. Zhamoyda, V. A. Zagorodnyh, Y. P. Kropachev, T. A. Kunaeva, S. M. Liksushchenkov, S. F. Manuylov, A. F. Morozov, B. N. Morozov, P. E. Moskalenko, E. N. Nesterova, O. V. Petrov, D. V. Ryabchuk, A. Y. Sergeev, V. V. Sivkov, M. A. Spiridonov, and V. A. Shahverdov, 2010: *Atlas geologicheskikh i ecologo-geologicheskikh kart Rossiyskogo sektora Baltiyskogo morya (Atlas of geological and ecological-geological maps of the Russian sector of the Baltic Sea)*. 77 p., ISBN 978-5-93761-165-9, EDN: [QKJKBD](#)
 2. Binczewska, A., M. Moros, I. A. Polovodova, J. Sławińska, and M. Bąk, 2018: 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*, **47** (1), 297–310, EDN: [YDFGQX](#), <https://doi.org/10.1111/bor.12267>
 3. Blazhchishin, A. I., 1998: *Paleografiya i evolutsiya pozdnechetvertichnogo osadkonakopleniya v Baltiyskom more (Paleogeography and evolution of Late Quaternary sedimentation in the Baltic Sea)*. Kaliningrad, Yantarnyy skaz, 160 p., https://rusneb.ru/catalog/010003_000061_a56f8e99a71c1529c086d74024addd1f/
 4. Croudace, I. W. and R. G. Rothwell, 2015: *Micro-XRF Studies of Sediment Cores: Applications of a non-destructive tool for the environmental sciences*, 688 p., <https://link.springer.com/book/10.1007/978-94-017-9849-5>
 5. Emelyanov, E. M., 2002: *Geology of the Gdansk Basin, Baltic Sea*. Kaliningrad, 494 p., ISBN 5-7406-0444-3, https://rusneb.ru/catalog/002744_000053_RU__%D0%93%D0%9F%D0%9D%D0%A2%D0%91+%D0%A0%D0%BE%D1%81%D1%81%D0%B8%D0%B8__KNB_IBIS__26.35%28922.0%29__%D0%9560-940527/
 6. Häusler, K., M. Moros, L. Wacker, L. Hammerschmidt, O. Dellwig, T. Leipe, A. Kotilainen, and H. W. Arz, 2016: Mid-to late Holocene environmental separation of the northern and central Baltic Sea basins in response to differential land uplift. *Boreas*, **46**, 111–128, EDN: [YVZFEZ](#), <https://doi.org/10.1111/bor.12198>
 7. Harff, J., R. Endler, E. Emelyanov, S. Kotov, T. Leipe, M. Moros, R. Olea, M. Tomczak, and A. Late Witkowski, 2011: *Quaternary climate variations reflected in Baltic Sea sediments. The Baltic Sea Basin*. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg, 99–132, https://link.springer.com/chapter/10.1007/978-3-642-17220-5_5
 8. Ivanov, M. V., 1981: The global biogeochemical sulphur Cycle. In: Likens G. E. (ed.) *Some perspectives of the major biogeochemical cycles SCOPE*, 61–78, https://scope.dge.carnegiescience.edu/SCOPE_17/SCOPE_17_1.4_Chapter4_61-78.pdf
 9. Jilbert, T. and C. P. Slomp, 2013: Rapid high-amplitude variability in Baltic Sea hypoxia during the Holocene. *Geology*, **41** (11), 1183–1186, <https://doi.org/10.1130/G34804.1>
 10. Kabel, K., M. Moros, C. Porsche, T. Neumann, F. Adolphi, T. Andersen, H. Siegel, M. Gerth, T. Leipe, E. Jansen, and J. Damsté, 2012: Impact of climate change on the Baltic Sea ecosystem over the past 1 000 years. *Nature climate change*, **2**, 871–874, <https://doi.org/10.1038/nclimate1595>
 11. Laskina, D., E. Dorokhova, and Y. Koroleva, 2024: Water content and Pb concentrations in the bottom sediments of the Gdansk Deep (South-Eastern Baltic Sea) according to the portable X-ray fluorescence analyzer Olympus VANTA C. *RJES*, **3**, ES3003, EDN: [XVPFOK](#), <https://doi.org/10.2205/2024ES000879>
 12. Leipe, T., F. Tauber, H. Vallius, J. Virtasalo, S. Uścinowicz, N. Kowalski, S. Nille, S. Lindgren, and T. Myllyvirta, 2011: Particulate organic carbon (POC) in surface sediments of the Baltic Sea, *Geo-Marine Lett.*, **31** (3), 175–188, EDN: [OKVCJX](#), <https://doi.org/10.1007/s00367-010-0223-x>

13. Leppäranta, M. and K. Myrberg, 2009: *Physical Oceanography of the Baltic Sea*. Springer Science & Business Media: New York. NY. USA. 378 p., <https://link.springer.com/book/10.1007/978-3-540-79703-6>
14. Marsh, R., R. A. Mills, D. R. Green, I. Salter, and S. Taylor, 2007: Controls on sediment geochemistry in the Crozet region, *Deep Sea Research*, **54** (18–20), 2260–2274, <https://doi.org/10.1016/j.dsr2.2007.06.004>
15. Ponomarenko, E. P. and L. A. Kuleshova, 2020: Paleoecological conditions of the Gdansk basin in the Holocene according to a comprehensive analysis of short sedimentation columns. *Vestnik Baltiyskogo federal'nogo universiteta im. I. Kanta. Seriya: Estestvennyye i meditsinskiye nauki*, **4**, 69–82, EDN: [XJPJKY](#)
16. Ponomarenko, E., T. Pugacheva, and L. Kuleshova, 2024: *Palaeoecological Conditions in the South-Eastern and Western Baltic Sea during the Last Millennium Quaternary*, **7** (4), 44 p., EDN: [CTVMWO](#), <https://doi.org/10.3390/quat7040044>
17. Reckermann, M., A. Omstedt, J. Pawlak, and H. Storch, 2014: Climate Change in the Baltic Sea region—What do we know? *Social Dimensions of Climate Change Adaptation in Coastal Regions: Findings from Transdisciplinary Research*, **5**, 19–32, <https://publications.hereon.de/id/32017/>
18. Renberg, I., M. W. Persson, and O. Emteryd, 1994: Pre-industrial atmospheric lead contamination detected in Swedish lake sediments, *Nature*, **368**, 323–326, <https://doi.org/10.1038/368323A0>
19. Rothwell, R. G., B. Hoogakker, J. Thomson, I. W. Croudace, and M. Frenz, 2006: Turbidite emplacement on the southern Balearic Abyssal Plain (western Mediterranean Sea) during Marine Isotope Stages 1–3: An application of ITRAX XRF scanning of sediment cores to lithostratigraphic analysis. *Geological Society of London Special Publication*, **267** (1), 79–98, <https://doi.org/10.1144/GSL.SP.2006.267.01.06>
20. Trouet, V., J. Esper, N. E. Graham, A. Baker, J. D. Scourse, and D. C. Frank, 2009: Persistent Positive North Atlantic Oscillation Mode Dominated the Medieval Climate Anomaly, *Science*, **324** (5923), 78–80, <https://doi.org/10.1126/science.1166349>
21. Trusova, A. M., A. D. Mironova, V. D. Shorokhova, A. O. Kopyshova, A. A. Akmanova, E. P. Ponomarenko, and A. S. Lodochnikova, 2025: Reconstruction of paleoecological conditions of the Gdansk basin of the Baltic Sea in the late Holocene. In the collection: *Proceedings of the XIII international scientific and practical conference «Marine Research and Education (MARESEDU-2024)»*, 313–318, EDN: [GTLZPO](#)
22. Wasmund, N., G. Nausch, and W. Matthäus, 1998: Phytoplankton spring blooms in the southern Baltic Sea—spatio-temporal development and long-term trends. *Journal of plankton research*, **20** (6), 1099–1117, EDN: [YCYWAO](#), <https://doi.org/10.1093/plankt/20.6.1099>
23. Winterhalter, B., 1992: Late-Quaternary stratigraphy of Baltic Sea basins – a review. *Bulletin of the Geological Society of Finland*, **64** (2), 189–194, <https://doi.org/10.17741/bgsf/64.2.007>
24. Zillén, L., D. J. Conley, T. Andrén, E. Andrén, and S. Björck, 2008: Past occurrences of hypoxia in the Baltic Sea and the role of climate variability, environmental change and human impact, *Earth-Sci. Rev.*, **91**, 77–92, EDN: [MCQDWJ](#), <https://doi.org/10.1016/j.earscirev.2008.10.001>
25. Zillén, L., C. Lenz, and T. Jilbert, 2012: Stable lead (Pb) isotopes and concentrations - A useful independent dating tool for Baltic Sea sediments. *Quat. Geochronol.*, **8**, 41–45, <https://doi.org/10.1016/j.quageo.2011.11.001>

Submitted 10.08.2025, accepted 10.11.2025.

For citation: Ponomarenko, E. P., A. A. Akmanova, V. D. Shorokhova, and A. O. Kopyshova, 2025: Reconstruction of environmental conditions in the south-eastern part of the Baltic Sea over the last millennium. *Journal of Oceanological Research*, **53** (4), 159–176, [https://doi.ocean.ru/10.29006/1564-2291.JOR-2025.53\(4\).9](https://doi.ocean.ru/10.29006/1564-2291.JOR-2025.53(4).9)

东南波罗的海近千年环境条件重建

E. P. Ponomarenko^{1,2}, A. A. Akmanova³, V. D. Shorokhova⁴, A. O. Kopyshova⁵

¹ Shirshov Institute of Oceanology, Russian Academy of Sciences,
36, Nakhimovskiy prospekt, Moscow, 邮编: 117997, Russia,

e-mail: ponomarenko.katharina@gmail.com;

² Immanuel Kant Baltic Federal University,
14, ul. A. Nevskogo, Kaliningrad, 邮编: 236041, Russia;

³ Voronezh State University,
1, pl. Universitetskaya, Voronezh, 邮编: 394018, Russia,

e-mail: Sanyabuld@yandex.ru;

⁴ School No. 24,
9, ul. Pionerskaya, Kaliningrad, 邮编: 236016, Russia,

e-mail: varya.shorokhova@bk.ru;

⁵ Phystech-Lyceum of Maths and Sciences named after P. L. Kapitsa,
7, ul. Letnaya, Dolgoprudny, 邮编: 141700, Russia,
电子邮件: antoninakopyshova@gmail.com

通过使用密封式小型取样管在格但斯克海盆和哥特兰海盆斜坡获取的三根短沉积柱样·重建了波罗的海近1000年来的古环境状况。研究显示·在表面生产力均较高的两个温暖气候时期——中世纪气候适宜期与现代增温期·其底层水体的氧环境存在显著差异。

在中世纪气候适宜期·人类活动影响低于现代·自然气候变异对海域生态系统具有重要影响·频繁流入的富氧北海水体有效阻止了底层缺氧的发展。而在现代增温期·人为源营养盐过量输入加速了富营养化进程·同时北海水体入侵的频率和规模下降·共同导致了广泛缺氧现象的发展。在较冷的小冰期·尽管水体入侵减少·但生产力下降保证了底层水体的充分氧饱和。

关键词：X射线荧光分析·短沉积柱样·中世纪气候适宜期·现代增温期·缺氧·富营养化

致谢说明：沉积柱样采集和结果解释工作受俄罗斯科教部给予希尔绍夫海洋研究所的国家任务(编号: FMWE-2024-0025)资助。地球化学分析在全俄科教计划»波罗的海剖面-康德波罗的联邦大学漂浮大学»(协议号: 075-03-2024-117)框架下完成。考察工作使用独特科研装置»科学院士约费号»科考船的装备完成·该船隶属»俄罗斯科学院海洋研究所科考船队»中心共享平台。

作者感谢A.D.米罗诺娃·A.M.特鲁索娃·A.S.洛多奇尼科娃和T.L.普加乔娃在地球化学分析及初步结果可视化方面作出的贡献·并感谢»科学院士约费号»全体船员在样品获取过程中提供的协助。