

ГИПОКСИЯ И АНОКСИЯ В ГДАНЬСКОЙ ВПАДИНЕ БАЛТИЙСКОГО МОРЯ В 2021–2023 гг.

Е. С. Бубнова^{1,2}, К. А. Ефимова^{1,2}, В. В. Сивков¹

¹*Институт океанологии им. П. П. Ширшова РАН,
Россия, 117997, Москва, Нахимовский проспект, д. 36;*

²*Балтийский федеральный университет им. И. Канта,
Россия, 236022, Калининград, ул. А. Невского, д. 14,
e-mail: bubnova.kat@gmail.com*

В 2021–2023 гг. различные участки Гданьской впадины демонстрировали разную сезонную динамику кислородных условий: для центральной части был характерен летне-осенний минимум концентрации кислорода, периферийные участки впадины отличались более равномерным внутригодовым распределением растворенного кислорода. Интрузии трансформированных североморских вод с небольшим содержанием кислорода могут частично аэрировать придонный слой и вызывать отрыв аноксийных вод от дна. В присклоновой юго-восточной части впадины в осенне-зимних штормовых условиях могут происходить амплитудные вертикальные колебания концентрации кислорода – от подъема гипоксических вод выше галоклина до полного устранения гипоксии в результате присклонового даунвеллинга, который действует как «кислородный насос». Уточнены гидролого-гидрохимические характеристики интрузий трансформированных североморских вод, проникающих в Гданьскую впадину и влияющих на динамику нефелоидного слоя биогеохимического происхождения, возникающего на границе окислительных и восстановительных условий.

Ключевые слова: Балтийское море, Гданьская впадина, кислород, сероводород, североморские воды, гипоксия, аноксия

Введение

В план реализации Десятилетия ООН, посвященного науке об океане в интересах устойчивого развития (2021–2030 гг.), включен проект «Экологические предикторы эвтрофикации Балтийского моря в связи с планируемой деятельностью человека». Помимо региональной значимости проект входит в более широкую повестку современной океанологии, связанную с зонами минимальных концентраций кислорода (Zhou et al., 2022). Актуальность такой повестки все больше возрастает в контексте понимания взаимосвязи между океаном и климатом.

Шельфовое внутриконтинентальное Балтийское море является крупнейшим в мире бассейном с солоноватой водой. Оно включает в себя несколько суббассейнов (впадин), разделенных порогами. Гидрометеорологический режим Балтийского моря в целом определяется общей атмосферной циркуляцией, речным стоком и водообменом с Северным морем (Антонов, 1987). Через мелководные Датские проливы

происходит сток распресненных балтийских вод в Северное море и проникновение в Балтику соленых североморских вод. Такое сочетание предопределяет эстуарный тип циркуляции и двуслойную гидрологическую структуру Балтийского моря с выраженным галоклином (пикноклином), градиент которого увеличивается (Liblik and Lips, 2019). Средняя соленость поверхностного слоя моря составляет 7 псс, а соленость придонного слоя зависит от «больших затоков», в частности, в Гданьской впадине она варьирует от 11 до 14 псс (Дубравин и Стонт, 2012). Средняя температура поверхностного слоя моря исследуемого района составляет 8.68 °С, придонного – 5.63 °С (Дубравин и Стонт, 2012). Спорадически, раз в несколько лет, возникают «большие затоки» североморских вод, которые кардинально меняют гидролого-гидрохимические условия в южной и центральной частях Балтийского моря (Wolf, 1972; Matthäus and Franck, 1992; Elken, Matthäus, 2008; Mohrholz, 2018).

Сочетание обширной, плотно заселенной и активно используемой человеком площади водосбора с ограниченным поступлением североморских вод делает Балтийское море уязвимым к эвтрофикации (HELCOM, 2023). К основным последствиям эвтрофикации относятся изменения в структуре и функционировании всей морской экосистемы, снижение ее стабильности и уменьшение концентрации растворенного кислорода в придонном слое моря (Zillén et al., 2008; Conley et al., 2009; Savchuk, 2018).

Начиная со второй половины XX века, в Балтийском регионе наблюдается устойчивое повышение температуры приповерхностного слоя атмосферы (Rutgersson et al., 2014; Meier et al., 2022) и температуры поверхности моря (Stockmayer and Lehmann, 2023). Как следствие снижается растворимость кислорода в поверхностном слое вод, увеличивается биомасса теплолюбивого планктона (Feuchtmaier et al., 2009), возрастает количество биогенного детрита в глубинных водах и содержание органического вещества в донных осадках. В то же время аэрации глубинных вод за счет атмосферного кислорода препятствует плотностная стратификация моря, а кислорода, поступившего в результате адвекции североморских вод, не хватает на полное окисление органического вещества. Как известно, в таком случае вместо кислорода в качестве окислителей будут использованы другие вещества, что обычно заканчивается восстановлением сульфатов и образованием сероводорода, токсичного для аэробных организмов (Yakushev, Newton, 2013). С 2007 по 2014 гг. средняя концентрация растворенного кислорода в Гданьской впадине составляла 1.01 мг/л, то есть придонный слой впадины находился в гипоксических условиях 7 лет (Кречик и др., 2017). После «большого затока» 2014 г. концентрация увеличилась до 3 мг/л, однако к третьему десятилетию XXI века кислородные условия вновь ухудшились.

Гипоксия, в большинстве публикаций определяемая как концентрация растворенного кислорода ниже 2 мг/л (Vaquer-Sunye and Duarte, 2008), и аноксия (отсутствие растворенного кислорода в воде, по Conley et al., 2009) рассматриваются как последовательные эффекты эвтрофикации, приводящие к гибели донной биоты и высвобождению фосфора фосфатов из донных осадков (Sommer et al., 2017), что обеспечивает внутренний источник питательных веществ для развития

цианобактерий, вносящих основной вклад в эвтрофикацию (Conley et al., 2002). Целью настоящей работы было проведение предварительного анализа изменчивости кислородных условий в глубинных водах российского сектора Гданьской впадины за период 2021–2023 гг. в условиях отсутствия «больших затоков» североморских вод.

Район, материалы и методы исследований

Гданьская впадина – крупная региональная отрицательная форма рельефа в Юго-Восточной Балтике с максимальной глубиной около 110 м (рисунок 1). В последние десятилетия, как и большинство впадин Балтийского моря, она подвержена постоянной гипоксии (Conley et al., 2009; Дубравин, 2012; Дубравин и др., 2012).

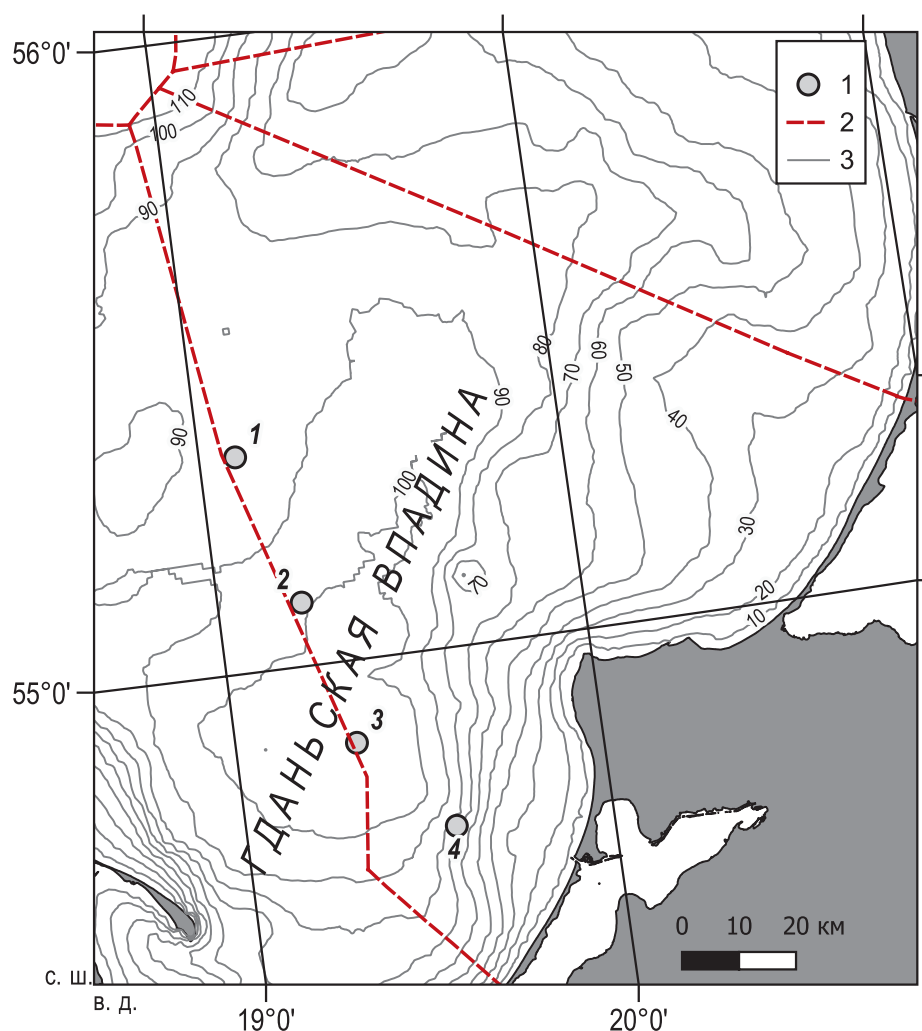


Рис. 1 – Район исследований и точки мониторинга кислородных условий в Гданьской впадине; 2 – границы исключительных экономических зон; 3 – изобаты через 10 м

В работе использовались данные экспедиционных исследований по концентрации кислорода и сероводорода за период с июля 2021 г. по декабрь 2023 г. (таблица 1).

Табл. 1. Список экспедиций

Название рейса	Период исследований
51-й рейс ПС «Академик Сергей Вавилов»	Июль 2021 г.
48-й рейс НИС «Академик Борис Петров»	Ноябрь 2021 г.
49-й рейс НИС «Академик Борис Петров»	Июнь 2022 г.
61-й рейс ПС «Академик Иоффе»	Июль 2022 г.
54-й рейс ПС «Академик Сергей Вавилов»	Ноябрь 2022 г.
91-й рейс НИС «Академик Мстислав Келдыш»	Декабрь 2022 г.
55-й рейс ПС «Академик Сергей Вавилов»	Апрель 2023 г.
53-й рейс НИС «Академик Борис Петров»	Май 2023 г.
МИС «Норд-3»	Июль 2023 г.
54-й рейс НИС «Академик Борис Петров»	Ноябрь 2023 г.
55-й рейс НИС «Академик Борис Петров»	Декабрь 2023 г.

Для анализа изменчивости кислородных и бескислородных (аноксии и наличия растворенного сероводорода) условий в Гданьской впадине (глубины >50 м) были выбраны точки мониторинга: 1 – в нижней части пологого северо-западного склона, 2 – в северо-западной части впадины, 3 – в центре впадины и 4 – у подножия крутого юго-восточного склона (рисунок 1).

Отбор проб воды осуществлялся с помощью гидрологического комплекса MWS Slimline (Hydrobios). Вертикальное распределение гидрофизических параметров было измерено с помощью зондов CTD90M (Sea&Sun Tech) и SAIV SD204. Отбор проб для определения концентраций растворенных кислорода и сероводорода осуществлялся с основных гидрологических горизонтов, в работе были использованы горизонты глубже 50 м: холодный промежуточный слой, выше галоклина, ниже галоклина, придонный слой с дополнительными горизонтами на 5 и 10 м выше дна.

Концентрация растворенного кислорода определялась модифицированным титриметрическим методом Винклера, а концентрация сероводорода – спектрофотометрическим методом измерения малых концентраций сульфидов с последующим перерасчетом на сероводород (Бордовский и Чернякова, 1992). Для удобства визуализации совмещенных данных вместо концентрации сероводорода использовался так называемый «отрицательный кислород» (Fonselius, 1969), где 1 мл сероводорода равен 2 мл кислорода, соответственно, 1 мг сероводорода равен 2.858 мг кислорода.

Результаты

Гипоксия (концентрация кислорода <2 мг/л) была характерна для всех точек мониторинга (рисунок 2). На северо-западной периферии Гданьской впадины (точка 1, глубина 90 м) ее верхняя граница была относительно стабильна и находилась в галоклине, на глубинах 65–75 м и на расстоянии 10–20 м от дна, а в конце 2023 г. она проявила тенденцию к резкому подъему вместе с галоклином. Развитие аноксии (отсутствие кислорода) и наличие растворенного сероводорода (-2.4 мг/л «отрицательного кислорода») было зафиксировано на глубине 78 м в ноябре 2023 г., к декабрю концентрация снизилась до -0.3 мг/л.

В придонном слое северной части впадины (точка 2, глубина 100 м) в 2021 г. концентрация кислорода в придонном слое равнялась 2.0 мг/л. В 2022 г. для придонного слоя точки 2 было характерно наличие растворенного сероводорода (вплоть до -3 мг/л «отрицательного кислорода»), мощность слоя отрицательных значений составила до 15 м от дна, а граница гипоксии была расположена на глубине 80 м. Весной 2023 г. на точке не был обнаружен сероводород, однако верхняя граница гипоксии поднялась до 70 м. В ноябре 2023 г. был зафиксирован промежуточный (на глубине 85 м) максимум содержания растворенного сероводорода (почти до -3 мг/л «отрицательного кислорода»), исчезнувший к декабрю. Верхняя граница гипоксии также была расположена на глубине 70 м.

В центре впадины (точка 3, глубина 108 м) до 2023 г. верхняя граница гипоксии находилась под галоклином, на глубинах 75–85 м. В 2023 г., как минимум с апреля, она располагалась глубже – в слое 90–100 м. Глубинный слой центральной части Гданьской впадины показал наиболее выраженную сезонную изменчивость в период 2021–2023 гг. Минимальные значения растворенного кислорода (-2.9 мг/л в 2021 г., -2.8 мг/л в 2022 г. и -4.3 мг/л в 2023 г.) были характерны для летнего периода (июля), что вполне закономерно, учитывая, что на этот период приходится максимальный уровень эвтрофикации. В ноябре 2021 и 2023 гг. в придонном слое концентрация растворенного кислорода в этой точке достигала 1.9 мг/л, в то время как в 2022 г. для ноября были характерны отрицательные значения (-2.7 мг/л).

У подножия юго-восточного склона впадины (точка 4, глубина 88 м) до осени 2023 г. слой придонной гипоксии ограничивался сверху глубинами 70–80 м, которые примерно соответствовали нижней части галоклина. В ноябре этого года, когда галоклин оказался практически размыт, гипоксия распространилась до горизонта ~ 60 м. В декабре ситуация кардинально изменилась – гипоксия исчезла по всей глубине, а в условиях размытого галоклина на глубине 80 м концентрация кислорода достигала аномальных по сравнению с предыдущими годами и остальными станциями значений -5.1 мг/л.

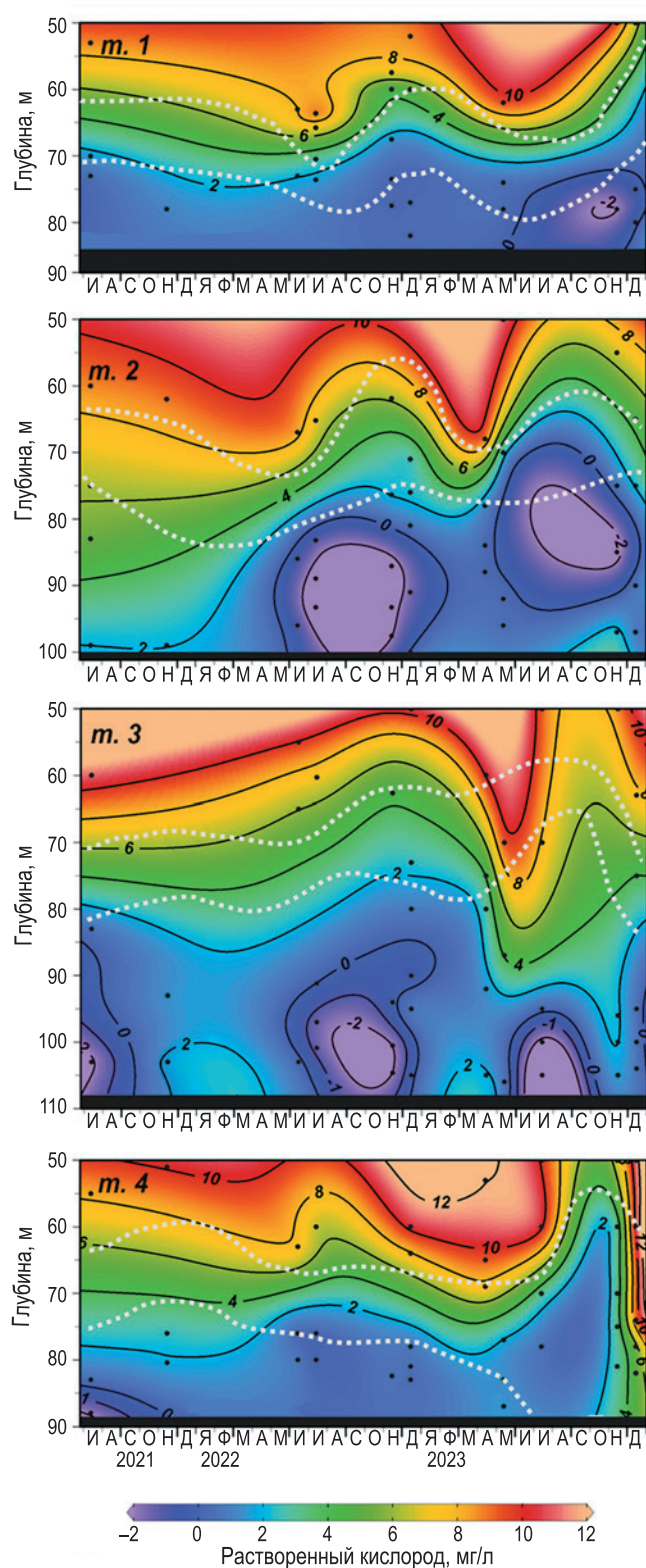


Рис. 2 – Изменение концентрации растворенного кислорода и сероводорода (в пересчете на отрицательный кислород) в точках мониторинга Гданьской впадины. Белым пунктиром ограничен пикноклин (плотность от 7.0 до 8.5 кг/м³), совпадающий с галоклином. Буквами обозначены месяцы

Обсуждение

Полученные нами в 2021–2023 гг. результаты характеризуют закономерности смены кислородных условий на бескислородные в Гданьской впадине в период отсутствия «больших затоков» североморских вод, начавшийся с 2015 г. (Mohrholz, 2018; Meier et al., 2022).

Сезонная цикличность аноксии, выявленная нами в центре Гданьской впадины, в основных чертах согласуется с выводами о ее летне-осеннем развитии в центральной части Балтийского моря, полученными в (Krapf et al., 2022). Авторы упомянутой статьи не описывали Гданьскую впадину, а также выражали аноксию в единицах площади, рассчитанной по одной (центральной) точке в каждой впадине. То есть слой бескислородных вод считался равномерно распределенным в чаше впадины. Выявленные нами в Гданьской впадине пространственно-временные различия аноксии указывают на некорректность такого подхода, по крайней мере, для впадин с заметным влиянием североморских вод.

Присклоновый апвеллинг вод, характеризующихся состоянием гипоксии, в юго-восточной части впадины (точка 4), который привел к «размыванию» гало-клина в ноябре 2023 г., был вызван умеренным, но устойчивым (8 суток) сгонным северо-восточным ветром, а аномальное декабрьское повышение концентрации кислорода в придонном слое произошло вследствие штормовых ветров западного направления при прохождении циклонов NIKLAS (23–24 ноября) (Архив погоды..., 2024). Экстремальное усиление ветро-волнового перемешивания происходило на фоне развития вертикальной конвекции в ходе сезонного выхолаживания и понижения температуры поверхностных вод (рисунок 3). Вместе с тем, совместное действие этих факторов не объясняет придонной аномалии концентрации кислорода, поскольку она не проявилась на других точках мониторинга, более удаленных от берега. Следовательно, привести к ее возникновению мог только интенсивный даунвеллинг у крутого юго-восточного склона Гданьской впадины, возникший как реакция на штормовые нагоны.

Со штормами может быть связан и отрыв зоны аноксии от дна в центре Гданьской впадины (точка 3) и смещение ее к северу (точки 2 и 1). Предположительно, шторма могли активизировать придонные и глубинные интрузии из Слупского желоба, расположенного западнее Гданьской впадины (Golenko et al., 2023). Под действием силы Кориолиса эти интрузии проникают прежде всего в южную и центральную части впадины. Соленость придонных вод Слупского желоба составляет 13–13.5 пс (Piechura et al., 1997; Schmidt et al., 2020), а концентрация растворенного кислорода – 4.6 мг/л (Schmidt et al., 2020), что выше, чем в других бассейнах Центральной Балтики. Таким образом, более плотные воды из Слупского желоба способны аэрировать придонный слой Гданьской впадины, подпирая «старые» аноксийные воды. Подобная ситуация была зафиксирована в центральной части Гданьской впадины в период между июлем и ноябрем 2023 г. (рисунок 3а и 3б). Придонная интрузия с соленостью >12 пс, аномально высокой температурой 8.9 °С (в июле температура придонного

слоя составляла 8 °С) и с концентрацией кислорода ~2 мг/л (в июле концентрация кислорода в придонном слое составляла 0 мг/л, а сероводорода ~2 мг/л). К декабрю придонный слой, воды которого поступили в период между июлем и ноябрем, начал перемешиваться с вышележащим: температура снизилась на 0.2 °С, а концентрация кислорода на 1.4 мг/л (рисунок 3в).

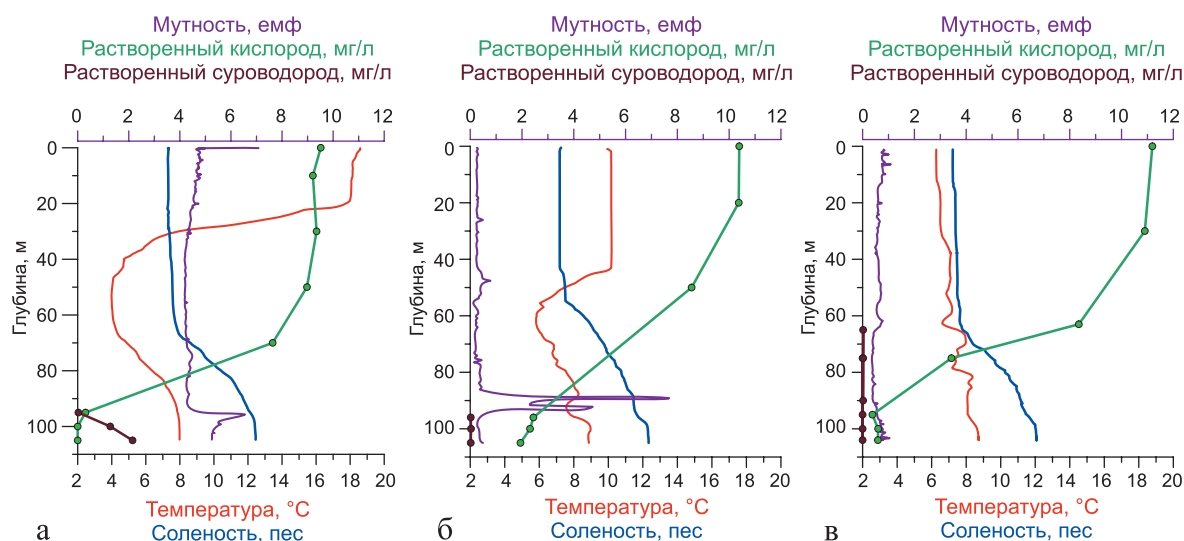


Рис. 3 – Вертикальное распределение температуры, солёности, мутности (по зонду SAIV), растворенного кислорода и сероводорода в центральной точке Гданьской впадины (точка 3) в июле (а), ноябре (б) и декабре (в) 2023 г.

Кроме заметного поступления растворенного кислорода, в ноябре 2023 г. в центральной части Гданьской впадины (точка 3) на глубинах 85–95 м и на расстоянии 10–20 м от дна обращает на себя внимание нефелоидный слой (слой повышенной мутности), имеющий тонкослоистую структуру (рисунок 3б). Сверху он ограничивался основным оксиклином, а снизу – придонным слоем, ассоциирующимся с упомянутой выше интрузией. Нефелоидный слой совпадал по глубине с промежуточным минимумом температуры (8 °С), который был приподнят от дна поступившей из Слупского желоба интрузией. В июле (рисунок 3а) в придонном слое Гданьской впадины концентрация растворенного сероводорода составляла ~2 мг/л, а в промежуточном холодном слое в ноябре он не обнаруживался, однако сероводород окисляется при контакте с кислородом. На геохимическом барьере «кислород–сероводород» (Emelyanov, 2002) при активном влиянии бактерий происходит резкое изменение форм миграции химических соединений, в частности гидроокислов железа и марганца, и возникают подобные нефелоидные слои (Сивков, Журов, 1991). Поскольку эти скопления взвешенных микрочастиц генетически не связаны с гидродинамическим режимом придонного слоя моря, то они могут находиться на удалении от дна. Таким образом, с большой вероятностью можно предположить, что обнаруженный нефелоидный слой находился в зоне контакта окислительных и восстановительных условий и имел биогеохимическую, а не литодинамическую, природу.

В декабре он перестал существовать (рисунок 3б). Причиной могло стать усиление ноябрьской придонной интрузии, что выразилось в возникновении придонного перемешанного слоя мощностью до 10 м, и эрозии слоя кислородного минимума снизу. Также в декабре на глубине 65–75 м проявилась еще одна интрузия (температура до 8.5 °С, концентрация кислорода 2–4 мг/л), которая эродировала кислородный минимум сверху. Обе интрузии привели к ликвидации геохимического барьера «кислород–сероводород».

Заключение

В 2021–2023 гг. в центре Гданьской впадины проявились летне-осенние максимумы содержания растворенного сероводорода, а гипоксия распространялась вплоть до ядра галоклина. Были зафиксированы случаи отрыва слоя, насыщенного сероводородом, от дна. Основным механизмом возникновения этого явления, вероятно, выступают промежуточные интрузии более соленых и насыщенных кислородом вод из Слупского желоба.

В конце 2023 г. в присклоновой юго-восточной части Гданьской впадины проявились амплитудные вертикальные колебания концентрации кислорода, своего рода «штормовые качели». Под воздействием ветров разного направления сначала возник апвеллинг, вызвавший подъем гипоксических вод выше галоклина. Затем его сменил интенсивный даунвеллинг как реакция на штормовой нагон. Он привел к исчезновению гипоксии и повышению концентрации растворенного кислорода в придонном слое до 5.1 мг/л.

Таким образом, впервые были выявлены механизмы, обеспечивающие действие вертикального конвективного переноса кислорода, который может аэрировать глубинные воды Балтийского моря наряду с адвективным переносом кислорода, обусловленным затоками североморских вод.

Благодарности. Работы выполнены по темам государственного задания ИО РАН № FMWE-2024-0025 и БФУ им. И. Канта № FZWM-2023-0002 (точка мониторинга 4). Авторы благодарны Ж. И. Стонт (АО ИО РАН) за информацию по штормовой активности в Юго-Восточной Балтике в конце 2023 г.

Список литературы

1. Антонов А. Е. Крупномасштабная изменчивость гидрометеорологического режима Балтийского моря и ее влияние на промысел. Л.: Гидрометеоиздат, 1987. 248 с.
2. Архив погоды в Балтийске. ООО «Расписание Погоды» // https://rp5.ru/Погода_в_Балтийске (дата обращения: 15.01.2024 г.).
3. Бордовский О. К., Чернякова А. М. Современные методы гидрохимических исследований океана. Методические указания. Москва: Институт океанологии им. П. П. Ширшова АН СССР, 1992. 201 с.
4. Дубравин В. Ф. Гидрохимический режим // Нефть и окружающая среда Калининградской области. Калининград: Терра Балтика, 2012. Т. II: Море. С. 106–120.
5. Дубравин В. Ф., Дорохова Е. В., Сивков В. В., Смыслов В. А. Гидрохимические показатели и взвешенное вещество // Нефть и окружающая среда Калининградской области. Калининград: Терра Балтика, 2012. Т. II: Море. С. 276–291.
6. Дубравин В. Ф., Стонт Ж. И. Гидрометеорологический режим, структура и циркуляция вод // Нефть и окружающая среда Калининградской области. Калининград: Терра Балтика, 2012. Т. II: Море. С. 69–106.
7. Кречик В. А., Капустина М. В., Бубнова Е. С., Гриценко В. А. Абиотические условия придонных вод Гданьской впадины Балтийского моря в 2016 году // Ученые записки Российского государственного гидрометеорологического университета. 2017. Т. 48. С. 186–194.
8. Сивков В. В., Журов Ю. И. О специфике скоплений взвеси во впадинах Балтийского моря // Океанология. 1991. Т. 31 (6). С. 1060–1066.
9. Conley D. J., Björck S., Bonsdorff E., Carstensen J., Destouni G., Gustafsson B. G., Hietanen S., Kortekaas M., Kuosa H., Markus Meier H. E., Müller-Karulis B. Hypoxia-related processes in the Baltic Sea // Environ. Sci. Technol. 2009. Vol. 43. P. 3412–3420. <https://doi.org/10.1021/es802762a>.
10. Elken J., Matthäus W. Baltic Sea oceanography. Regional Climate Studies, Assessment of climate change for the Baltic Sea Basin. Annex A. 2008. Vol. 1. P. 379–385.
11. Emelyanov E. M. Geochemistry of suspended matter and bottom sediments of the Gdansk Basin and processes of sedimentation // Geology of the Gdansk Basin. Baltic Sea. Kaliningrad: Yantarny skaz, 2002. P. 220–302.
12. Feuchtmayr H., Moran R., Hatton K., Connor L., Heyes T., Moss B., Harvey I., Atkinson D. Global warming and eutrophication: effects on water chemistry and autotrophic communities in experimental hypertrophic shallow lake mesocosms // Journal of Applied Ecology. 2009. Vol. 46 (3). P. 713–723. <https://doi.org/10.1111/j.1365-2664.2009.01644.x>.
13. Fonselius S. Hydrography of the Baltic Deep Basins III. Fish. Bd Sweden, Ser. Hydrography, Rep. 23. 1969. 97 pp.
14. Golenko M., Paka V., Zhurbas V., Korzh A., Kondrashov A. Intermediate plumes of low oxygen in the southeastern Baltic Sea // Oceanology. 2023. Vol. 65 (1). P. 100–116. <https://doi.org/10.1016/j.oceano.2021.12.003>.
15. HELCOM. State of the Baltic Sea. Third HELCOM holistic assessment 2016–2021. Baltic Sea Environment Proceedings No. 194. 2023.
16. Krapf K., Naumann M., Dutheil C., Meier H. Investigating Hypoxic and Euxinic Area Changes Based on Various Datasets From the Baltic Sea // Front. Mar. Sci. 2022. Vol. 9. P. 823476. <https://doi.org/10.3389/fmars.2022.823476>.
17. Liblik T., Naumann M., Alenius P., Hansson M., Lips U., Nausch G., Tuomi L., Wesslander K., Laanemets J., Viktorsson L. Propagation of impact of the recent Major Baltic Inflows from

- the Eastern Gotland Basin to the Gulf of Finland // *Frontiers in Marine Science*. 2018. Vol. 5. P. 222.
18. *Matthäus W., Franck H.* 1992. Characteristics of major Baltic inflows – a statistical analysis // *Continental Shelf Research*. 1992. Vol. 12 (12). P. 1375–1400.
 19. *Meier M. H. E., Barghorn L., Børge F., Gröger M., Naumov L., Radtke H.* Multidecadal climate variability dominated past trends in the water balance of the Baltic Sea watershed // *Climate and Atmospheric Science*. 2023. Vol. 6 (1). P. 58. <https://doi.org/10.5194/esd-13-457-2022>.
 20. *Meier H. M., Kniebusch M., Dieterich C., Gröger M., Zorita E., Elmgren R., Myrberg K., Ahola M. P., Bartosova A., Bonsdorf E., Börgel F.* Climate change in the Baltic Sea region: a summary // *Earth System Dynamics*. 2022. Vol. 13 (1). P. 457–593. <https://doi.org/10.1038/s41612-023-00380-9>.
 21. *Mohrholz V.* Major Baltic inflow statistics–revised // *Frontiers in Marine Science*. 2018. Vol. 5. P. 384. <https://doi.org/10.3389/fmars.2018.00384>.
 22. *Piechura J., Walczowski W., Beszczynska-Moller A.* On the structure and dynamics of the water in the Slupsk Furrow // *Oceanographic Literature Review*. 1997. Vol. 11 (44). P. 1238.
 23. *Rutgersson A., Jaagus J., Schenk F., Stendel M.* Observed changes and variability of atmospheric parameters in the Baltic Sea region during the last 200 years // *Climate Research*. 2014. No. 61. P. 177–190. <https://doi.org/10.3354/cr01244>.
 24. *Savchuk O. P.* Large-scale nutrient dynamics in the Baltic Sea, 1970–2016 // *Frontiers in Marine Science*. 2018. Vol. 5. P. 95.
 25. *Schmidt B., Wodzinowski T., Bulczak A. I.* Long-term variability of near-bottom oxygen, temperature, and salinity in the Southern Baltic // *Journal of Marine Systems*. 2020. Vol. 103462. <https://doi.org/10.1016/j.jmarsys.2020.103462>.
 26. *Stockmayer V., Lehmann A.* Variations of temperature, salinity and oxygen of the Baltic Sea for the period 1950 to 2020 // *Oceanology*. 2023. Vol. 65 (3). P. 466–483.
 27. *Vaquier-Sunyer R., Duarte C. M.* Thresholds of hypoxia for marine biodiversity // *Proceedings of the National Academy of Sciences*. 2008. Vol. 105 (40). P. 15452–15457.
 28. *Wolf G.* Salzwassereinbrüche im Gebiet der westlichen Ostsee. *Beitr. Meereskunde*. 1972. Vol. 29. P. 67–77.
 29. *Yakushev E. V., Newton A.* Introduction: redox interfaces in marine waters // *Chemical Structure of Pelagic Redox Interfaces: Observation and Modeling*. 2013. P. 1–12.
 30. *Zhou Y., Gong H., Zhou F.* Responses of horizontally expanding oceanic oxygen minimum zones to climate change based on observations // *Geophysical Research Letters*. 2022. Vol. 49 (6). P. 1–11. <https://doi.org/10.1029/2022GL097724>.
 31. *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-Science Reviews*. 2008. Vol. 91 (1–4). P. 77–92.

Статья поступила в редакцию 10.02.2024, одобрена к печати 07.06.2024.

Для цитирования: Бубнова Е. С., Ефимова К. А., Сивков В. В. Гипоксия и аноксия в Гданьской впадине Балтийского моря в 2021–2023 гг. // *Океанологические исследования*. 2024. № 52 (2). С. 58–71. [https://doi.org/10.29006/1564-2291.JOR-2024.52\(2\).4](https://doi.org/10.29006/1564-2291.JOR-2024.52(2).4).

HYPOXIA AND ANOXIA IN THE GDANSK DEEP (BALTIC SEA) IN 2021–2023

E. S. Bubnova^{1,2}, K. A. Efimova^{1,2}, V. V. Sivkov¹

¹*Shirshov Institute of Oceanology, Russian Academy of Sciences,
36, Nakhimovskiy prospekt, Moscow, 117997, Russia;*
²*Immanuel Kant Baltic Federal University,
14, str. A. Nevskogo, Kaliningrad, Russia, 236022,
e-mail: bubnova.kat@gmail.com*

The central part of Gdansk Deep experienced summer-autumn dissolved oxygen minima within 2021–2023, while along the periphery of the Deep no seasonality was detected. Intrusions of transformed North Sea waters with a low oxygen content can partially aerate the bottom layer and cause anoxic waters to detach from the bottom. In the near-slope southeastern part of the Deep, in autumn-winter storm conditions, amplitude vertical fluctuations in oxygen concentration can occur – from the rise of hypoxic waters above the halocline, to the complete elimination of hypoxia as a result of near-slope downwelling, which acts as an “oxygen pump”. The hydrological and hydrochemical characteristics of intrusions of transformed North Sea waters penetrating into the Gdansk Basin and influencing the dynamics of the nepheloid layer of biogeochemical origin, arising at the boundary of oxidizing and reducing conditions, have been clarified.

Keywords: Baltic Sea, Gdansk Deep, oxygen, hydrogen sulfide, major Baltic inflow, hypoxia, euxinic waters

Acknowledgment: the work was supported by the state assignment of the Institute of Oceanology RAS No. FMWE-2024-0025 and the No. IKBFU FZWM-2023-0002 (monitoring point 4). The authors are grateful to Zh. I. Stont (IO RAS) for information on storm activity in the South-Eastern Baltic at the end of 2023.

References

1. Antonov, A. E., 1987: *Krupnomasshtabnaya izmenchivost' gidrometeorologicheskogo rezhima Baltiyskogo morya i yeye vliyaniye na promysel (Large-scale variability of the hydrometeorological regime of the Baltic Sea and its impact on fisheries)*. Leningrad, Hydrometeoizdat, 248 p.
2. Bordovsky, O. K. and A. M. Chernyakova, 1992: *Sovremennyye metody gidrokhimicheskikh issledovaniy okeana. Metodicheskiye ukazaniya (Modern hydrochemical methods in oceanology)*. Moscow, IO AN SSSR, 201 p.
3. Conley, D. J., S. Björck, E. Bonsdorff, J. Carstensen, G. Destouni, B. G. Gustafsson, S. Hietanen, M. Kortekaas, H. Kuosa, M. H. E. Meier, and B. Müller-Karulis, 2009: Hypoxia-related processes in the Baltic Sea. *Environmental Science and Technology*, **43**, 3412–3420, <https://doi.org/10.1021/es802762a>.
4. Dubravin, V. F., Ye. V. Dorokhova, V. V. Sivkov, and V. A. Smyslov, 2012: *Gidrokhimicheskiye pokazateli i vzveshennoye veshchestvo (Hydrochemical parameters and total suspended matter)*. *Neft' i okruzhayushchaya sreda Kaliningradskoy oblasti*, Kaliningrad, “Terra Baltika”, **II**, 276–291.

5. Dubravin, V. F., 2021: Gidrokhimicheskiy rezhim (Hydrochemical regime). *Neft' i okruzhayushchaya sreda Kaliningradskoy oblasti*, Kaliningrad, "Terra Baltika", **II**, 106–120.
6. Dubravin, V. F. and Zh. I. Stont, 2012: Gidrometeorologicheskiy rezhim, struktura i tsirkulyatsiya vod (Hydrometeorological regime, structure and circulation of water). *Neft' i okruzhayushchaya sreda Kaliningradskoy oblasti*, Kaliningrad, "Terra Baltika", **II**, 69–106.
7. Elken, J. and W. Matthäus, 2008: Baltic Sea oceanography. Regional Climate Studies. *Assessment of climate change for the Baltic Sea Basin*, Annex A, **1**, 379–385.
8. Emelyanov, E. M., 2002: Geochemistry of suspended matter and bottom sediments of the Gdansk Basin and processes of sedimentation. *Geology of the Gdansk Basin. Baltic Sea*, Kaliningrad, Yantarny skaz, 220–302.
9. Feuchtmayr, H., R. Moran, K. Hatton, L. Connor, T. Heyes, B. Moss, I. Harvey, and D. Atkinson, 2009: Global warming and eutrophication: effects on water chemistry and autotrophic communities in experimental hypertrophic shallow lake mesocosms. *Journal of Applied Ecology*, **46** (3), 713–723, <https://doi.org/10.1111/j.1365-2664.2009.01644.x>.
10. Fonselius, S., 1969: *Hydrography of the Baltic Deep Basins*. Fiskeristyrelsen, Göteborg, 23, 97 p.
11. Golenko, M., V. Paka, V. Zhurbas, A. Korzh, and A. Kondrashov, 2023: Intermediate plumes of low oxygen in the southeastern Baltic Sea. *Oceanology*, **65** (1), 100–116, <https://doi.org/10.1016/j.oceano.2021.12.003>.
12. HELCOM, 2023: State of the Baltic Sea. Third HELCOM holistic assessment 2016–2021. *Baltic Sea Environment Proceedings*. No. 194.
13. Krapf, K., M. Naumann, C. Dutheil, and H. Meier, 2022: Investigating Hypoxic and Euxinic Area Changes Based on Various Datasets From the Baltic Sea. *Frontiers in Marine Science*, **9**, 823476, <https://doi.org/10.3389/fmars.2022.823476>.
14. Krechik, V. A., M. V. Kapustina, E. S. Bubnova, and V. A. Gritsenko, 2017: Abioticheskiye usloviya pridonnykh vod Gdan'skoy vpadiny Baltiyskogo morya v 2016 godu (Abiotic conditions of bottom waters of the Gdansk basin of the Baltic Sea in 2016). *Scientific notes of the Russian hydrometeorological university*, **48**, 186–194.
15. Liblik, T., M. Naumann, P. Alenius, M. Hansson, U. Lips, G. Nausch, L. Tuomi, K. Wesslander, J. Laanemets, and L. Viktorsson, 2018: Propagation of impact of the recent Major Baltic Inflows from the Eastern Gotland Basin to the Gulf of Finland. *Frontiers in Marine Science*, **5**, 222.
16. Matthäus, W. and H. Franck, 1992: Characteristics of major Baltic inflows – a statistical analysis. *Continental Shelf Research*, **12** (12), 1375–1400.
17. Meier, M. H. E., M. Kniebusch, C. Dieterich, M. Gröger, E. Zorita, R. Elmgren, K. Myrberg, M. P. Ahola, A. Bartosova, E. Bonsdorf, and F. Börgel, 2022: Climate change in the Baltic Sea region: a summary. *Earth System Dynamics*, **13** (1), 457–593, <https://doi.org/10.5194/esd-13-457-2022>.
18. Meier, M. H. E., L. Barghorn, F. Borge, M. Gröger, L. Naumov, and H. Radtke, 2023: Multidecadal climate variability dominated past trends in the water balance of the Baltic Sea watershed. *Climate and Atmospheric Science*, **6** (1), 58, <https://doi.org/10.1038/s41612-023-00380-9>.
19. Mohrholz, V., 2018: Major Baltic inflow statistics—revised. *Frontiers in Marine Science*, **5**, 384, <https://doi.org/10.3389/fmars.2018.00384>.
20. Piechura, J., W. Walczowski, and A. Beszczynska-Moller, 1997: On the structure and dynamics of the water in the Slupsk Furrow. *Oceanographic Literature Review*, **11** (44), 1238.
21. Rutgersson, A., J. Jaagus, F. Schenk, and M. Stendel, 2014: Observed changes and variability of atmospheric parameters in the Baltic Sea region during the last 200 years. *Climate Research*, **61**, 177–190, <https://doi.org/10.3354/cr01244>.

22. Savchuk, O. P., 2018: Large-scale nutrient dynamics in the Baltic Sea, 1970–2016. *Frontiers in Marine Science*, **5**, 95.
23. Schmidt, B., T. Wodzinowski, and A. Bulczak, 2020: Long-term variability of near-bottom oxygen, temperature, and salinity in the Southern Baltic. *Journal of Marine Systems*, **103462**. <https://doi.org/10.1016/j.jmarsys.2020.103462>.
24. Stockmayer, V. and A. Lehmann, 2023: Variations of temperature, salinity and oxygen of the Baltic Sea for the period 1950 to 2020. *Oceanology*, **65** (3), 466–483.
25. Sivkov, V. V. and Yu. I. Zhurov, 1991: O spetsifike skopleniy vzvesi vo vpadinakh Baltijskogo moray (Regarding nepheloid layers in the Baltic Sea basins). *Oceanology*, **31** (6), 1060–1066.
26. Vaquer-Sunyer, R. and C. M. Duarte, 2008: Thresholds of hypoxia for marine biodiversity. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, **105** (40), 15452–15457.
27. *Weather archive in Baltijsk*, <https://rp5.ru/> (last accessed in 15.01.2024 г.).
28. Wolf, G., 1972: *Salzwassereinbrüche im Gebiet der westlichen Ostsee*. Beitr. Meereskunde, **29**, 67–77.
29. Yakushev, E. V. and A. Newton, 2013: Introduction: redox interfaces in marine waters. *Chemical Structure of Pelagic Redox Interfaces: Observation and Modeling*, 1–12.
30. Zhou, Y., H. Gong, and F. Zhou, 2022: Responses of horizontally expanding oceanic oxygen minimum zones to climate change based on observations. *Geophysical Research Letters*, **49** (6), 1–11, <https://doi.org/10.1029/2022GL097724>.
31. 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-Science Reviews*, **91** (1–4), 77–92.

Submitted 10.02.2024, accepted 07.06.2024.

For citation: Bubnova, E. S., K. A. Efimova, and V. V. Sivkov, 2024: Hypoxia and anoxia in the Gdansk Deep (Baltic Sea) in 2021–2023. *Journal of Oceanological Research*, **52** (2), 58–71, [https://doi.org/10.29006/1564-2291.JOR2024.52\(2\).4](https://doi.org/10.29006/1564-2291.JOR2024.52(2).4).