

УДК 551.465.63:[551.463.8+551.464.34+551.464.38](261.24)«450.1»

*В.А. Кречик**, *М.В. Капустина**, *Е.С. Бубнова**, *В.А. Гриценко***

**АБИОТИЧЕСКИЕ УСЛОВИЯ ПРИДОННЫХ ВОД
ГДАНЬСКОЙ ВПАДИНЫ БАЛТИЙСКОГО МОРЯ В 2016 ГОДУ**

* Институт океанологии им. П.П. Ширшова РАН, myemail.gav@gmail.com;

** Балтийский федеральный университет им. И. Канта, gritsenko_vl@mail.ru

V.A. Krechik, M.V. Kapustina, E.S. Bubnova, V.A. Gritsenko

**ABIOTIC CONDITIONS OF BOTTOM WATERS IN THE GDANSK
DEEP OF THE BALTIC SEA IN 2016**

В статье выполнены описание и анализ изменчивости основных абиотических факторов – температуры, солености, содержания кислорода и концентрации взвеси – для придонных вод Гданьской впадины Балтийского моря на основе данных контактных измерений 2003–2016 гг. Анализ данных показал рост интенсивности водообмена с Северным морем в 2015–2016 гг., который нашел отражение в повышении значений термохалинных показателей и содержания растворенного кислорода в придонном слое Гданьской впадины. Концентрация взвешенного вещества не показала какой-либо значимой зависимости от изменчивости других абиотических параметров. Полученные оценки позволяют подтвердить решающую роль адвективного фактора для экологического благополучия придонных вод глубоководных впадин Балтийского моря и могут быть востребованы при выполнении различного рода прогнозов эволюции придонных сообществ или процессов.

Ключевые слова: Балтийское море, Гданьская впадина, термохалинная структура, содержание кислорода, концентрация взвеси, затоки, сероводородное загрязнение.

In this article we give a description and analysis of the variability of the main abiotic factors – temperature, salinity, oxygen content and concentration of suspended matter for bottom waters of the Gdansk basin of the Baltic sea on the basis of the contact data from 2003 to 2016 years. An analysis of the total data set showed the intensification of water exchange with the North Sea in 2015–2016 reflected in the temperature, salinity and dissolved oxygen concentration increase in the bottom layer of the Gdansk deep. The concentration of suspended matter did not show any significant dependence on the variability of other abiotic parameters. The obtained estimates make it possible to support the leading role of the advective factor for the ecological state of the Baltic Sea deeps bottom water and they may be used to perform various kinds of predictions of the evolution of near-bottom communities or processes.

Keywords: Baltic sea, Gdansk deep, thermohaline structure, dissolved oxygen, suspended matter, inflows, hydrosulphuric pollution.

Введение

Хорошо известно, что Балтийское море имеет две основные структурные гидрологические зоны – поверхностную, распресненную речным стоком и осадками, и глубинную, термохалинные параметры которой формируют затоки североморских вод и процессы зимней конвекции в северной части моря. Известно также [4], что на экологию поверхностного слоя свое негативное влияние оказывают различного рода загрязнения, поступающие с речным стоком, осадками, а также

в процессе хозяйственной деятельности. Одним из проявлений экологического неблагополучия поверхностного слоя Балтики стали процессы эвтрофикации, проявляющиеся в массовом цветении водорослей на обширных участках поверхности моря. Эти процессы сегодня находятся в фокусе внимания исследователей и относительно хорошо изучены и описаны в научной литературе [5].

Экологическое же благополучие глубинных слоев моря прямо связано с одним из важнейших режимобразующих факторов формирования гидрологических условий всего Балтийского моря – водообменом с Северным морем. Известно [1], что в условиях отсутствия адвективного поступления североморских вод придонный слой Гданьской впадины подвержен стагнации, спорадически порождающей образование бескислородных зон и появление очагов сероводородного заражения придонных вод. Соленость, температура, растворенный кислород и концентрация взвешенного осадочного вещества являются абиотическими факторами, определяющими структуру и функционирование водных экосистем, а также седиментационные условия в придонном слое [2].

Целью работы стало описание внутригодовой изменчивости основных абиотических факторов придонных вод в Гданьской впадине Балтийского моря на протяжении 2016 г.

Материалы и методы

В 2016 г. Атлантическим отделением Института океанологии им. П.П. Ширшова РАН было выполнено 7 рейсов научно-исследовательских судов «Профессор Штокман», «Академик Мстислав Келдыш» и «Академик Николай Страхов» в акваторию Гданьской впадины в пределах исключительной экономической зоны (ИЭЗ) РФ. На станции 22 мониторинговой сети нефтяного месторождения «Кравцовское» (рис. 1) в ходе экспедиций были получены значения температуры и солености мультипараметрическими зондами Idronaut Ocean Seven 316 Plus и Sea & Sun Tech CTD90M. Также были измерены значения содержания растворенного кислорода и взвешенного вещества. Кислород определялся классическим объемным методом йодометрического титрования по Винклеру. Взвешенное осадочное вещество выделялось из воды методом ультрафильтрации под давлением 0,4 бар через фильтры с диаметром пор 0,45 мкм.

Обсуждение результатов

Как было отмечено выше, при продолжительном отсутствии интрузий североморских вод, называемых также «большими затоками», в придонных слоях Балтики происходит уменьшение содержания растворенного кислорода и интенсивное перераспределение соединений фосфора и азота из донных отложений в воду. С 80-х годов прошлого века и вплоть до первой декады 2000-х годов количество затоков уменьшилось с 5–7 за декаду до одного [8]. В декабре 2014 г. был зафиксирован первый за декаду большой заток [9]. С ноября 2015 по октябрь 2016 г., по данным Федерального агентства морского судоходства и гидрографии, предоставляющего данные с измерительных станций, входящих в сеть мониторинга окружающей среды (MARNET), в западной части Балтийского моря отмечалось неоднократное повышение солености придонных вод. В частности, в период с ноября

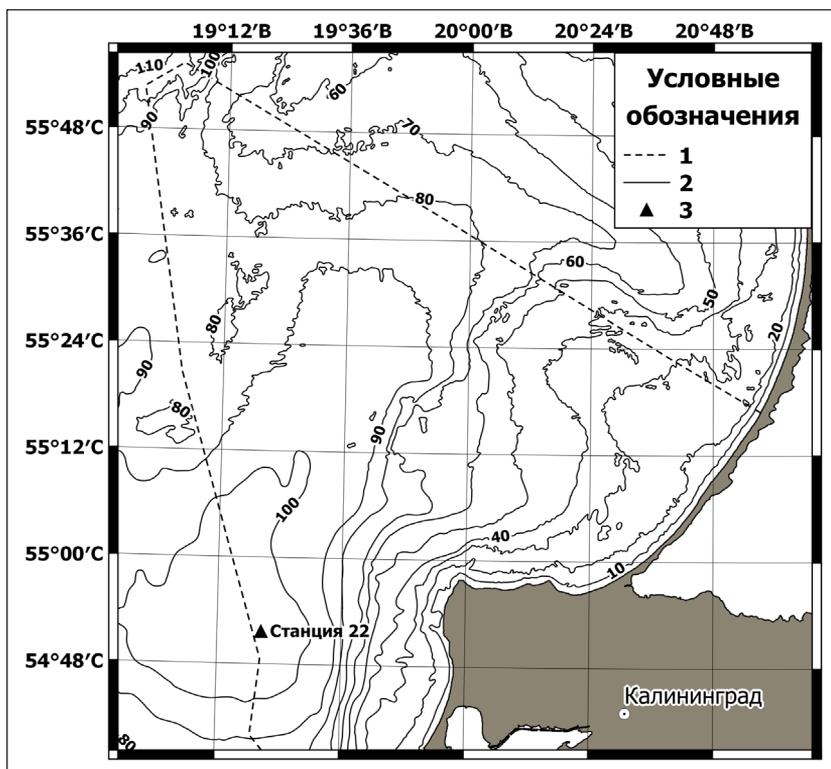


Рис. 1. Рельеф дна и очертания береговой линии в районе Гданьской впадины Балтийского моря: 1 – граница ИЭЗ РФ; 2 – изобаты (проведены через 10 м); 3 – станция 22 мониторинговой сети месторождения «Кравцовское» в Балтийском море

2015 г. по январь 2016 г. и с середины февраля по март 2016 г. на станции, находящейся в Арконском бассейне (54° 53' с. ш., 13° 52' в. д.), был отмечен неоднократный рост значений солености с 14 до 21 psu. Следующий период, когда значения солености достигали 18–20 psu, пришелся на середину августа – середину октября 2016 г. На рис. 2 приведен ход солености придонных вод в Арконской котловине на станции Аркона мониторинговой сети MARNET за 2015–2016 гг., построенный на основе данных, предоставленных Немецким центром океанографических данных [BSH/DOD (M41, соглашение 2518/2016-075)].

Анализ хода солености в Арконском бассейне и Гданьской впадине показал, что для их придонных слоев характерна разница во времени наступления экстремумов данного параметра. Это смещение зависит от величины и интенсивности конкретного затокового события и в 2016 г. составило в среднем 3 месяца. Такое значение вполне соответствует полученным ранее оценкам в 2–4 месяца [10, 11].

Для понимания общих особенностей изменчивости термohалинных показателей, концентрации взвешенного вещества и растворенного кислорода в придонном слое Гданьской впадины был изучен ход абиотических факторов за период

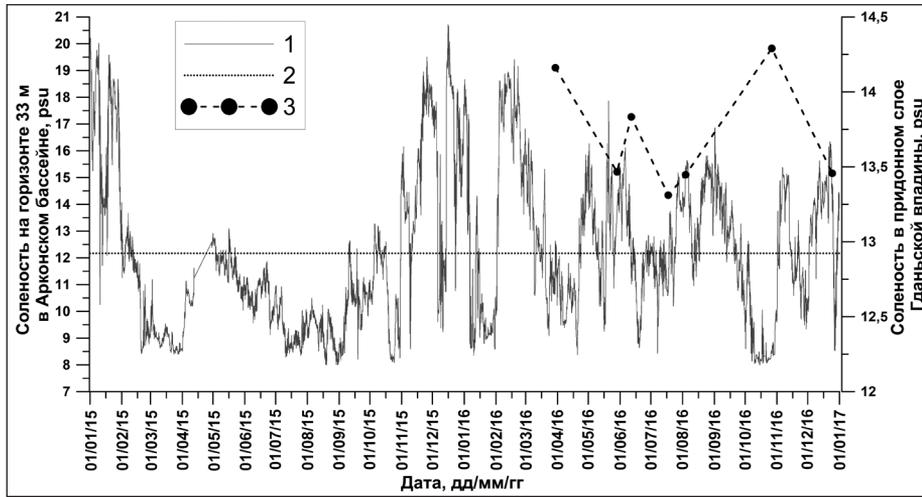


Рис. 2. Ход солености придонных вод в 2015–2016 гг. в Арконском бассейне и Гданьской впадине. Соответствующий тип линий, приведенных на рисунке: 1 – ход солености на горизонте 33 м в Арконском бассейне; 2 – средняя соленость на горизонте 33 м в Арконском бассейне за период 01.01.2015–01.01.2017 гг.; 3 – ход солености в придонном слое на станции 22 (Гданьская впадина Балтийского моря)

с мая 2003 г. по декабрь 2016 г. Соответствующие графики, построенные по данным STD-измерений на станции 22, приведены на рис. 3.

Ход солености придонного слоя в период 2003 – начало 2004 г. характеризуется довольно высокими значениями (13,3 psu), являющимися последствием мощного затока 2003 г. Позднее произошло снижение значений на 0,8–1 psu. Следующий пик наблюдался в марте 2007 г. В период 2008–2014 гг. соленость снизилась до 11,1–12 psu. Резкий подъем солености до значения 14,2 psu происходит в начале 2015 г. и является проявлением одного из сильнейших затоковых событий в истории наблюдений [8].

Ход значений температуры во многом повторяет ход солености. Коэффициент корреляции этих двух рядов составляет 0,35 (см. рис. 3, а). На графиках отчетливо видны периоды повышения солености и температуры в 2003, 2006, 2007 и 2015–2016 гг.

Концентрация взвешенного вещества за исследуемый период изменялась скачкообразно и не демонстрировала какой-либо значимой зависимости от других абиотических параметров. Максимальный коэффициент корреляции ряда значений взвеси наблюдался со значениями температуры и составил 0,24. С 2003 по 2016 г. можно выделить девять локальных максимумов концентрации взвеси со значением больше 1,13 мг/л, при этом три из них приходится на 2015–2016 гг. (см. рис. 3, б).

Изменение содержания растворенного в воде кислорода носило квазипериодический характер – максимумы фиксировались в весенний период и ранней осенью, минимальные значения были характерны для лета, а также измерений, выполненных поздней осенью и зимой. Временной ход этого параметра можно условно

разделить на три периода. Для первого, продолжавшегося до марта 2007 г., было характерно значительное содержание кислорода. Среднее значение за это время составило 2,02 мл/л. С июля 2007 г. по октябрь 2014 г. содержание растворенного кислорода снизилось до 0,36–0,51 мл/л. Среднее значение в этот промежуток

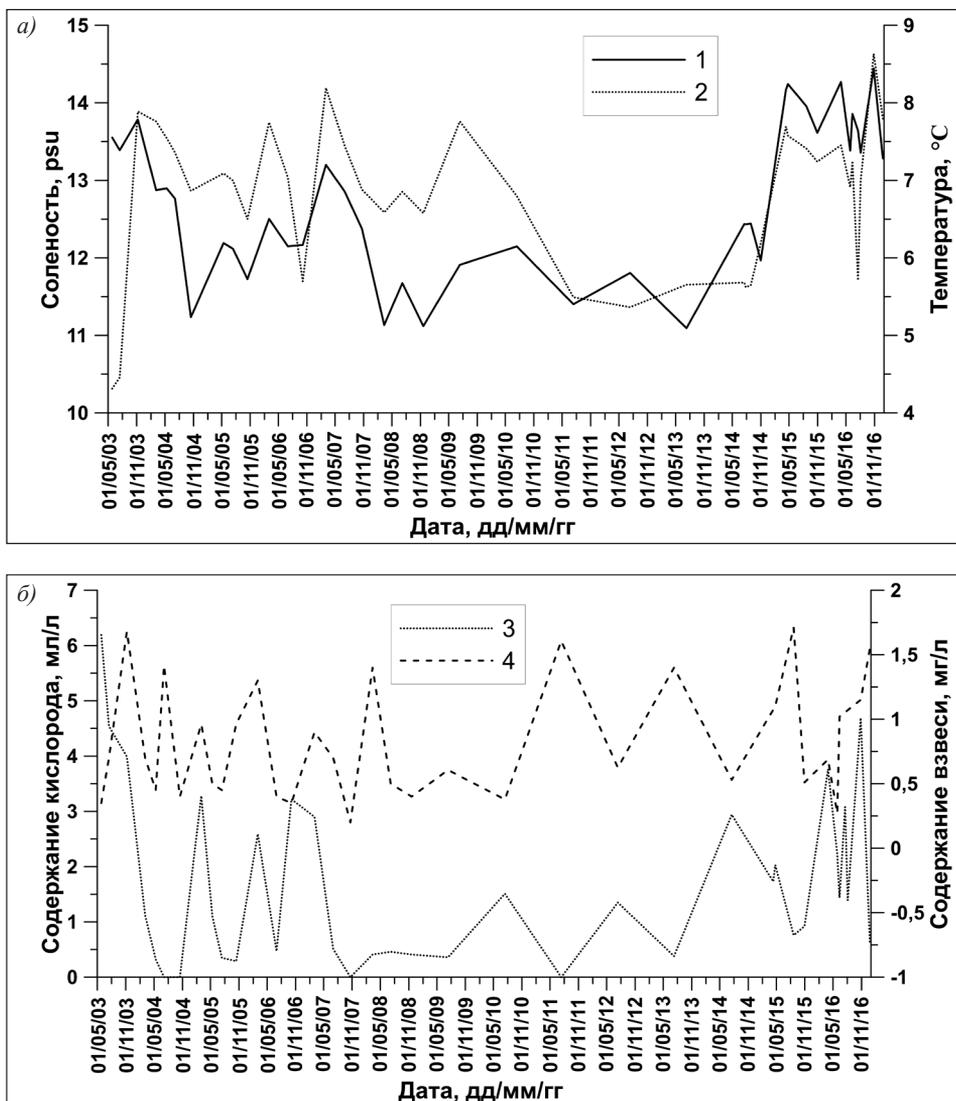


Рис. 3. Ход абиотических показателей в придонном слое Гданьской впадины Балтийского моря за период 2003–2016 гг.: а – солености и температуры; б – концентраций растворенного кислорода и взвешенного вещества. Соответствие типа и содержания линий, приведенных на рисунке: 1 – ход солености; 2 – ход температуры; 3 – ход концентрации растворенного кислорода; 4 – ход концентрации взвешенного вещества

времени составляло 0,76 мл/л. Третий период, когда среднее значение содержания растворенного кислорода снова увеличилось до 2,06 мл/л, начался весной 2015 г. За время мониторинговых наблюдений с 2003 по 2016 г. было зафиксировано четыре случая полного отсутствия кислорода в придонных водах. Очевидно, что данное обстоятельство неминуемо приводило к ухудшению экологической обстановки в придонном слое Гданьской впадины. Результаты количественных оценок временных рядов абиотических параметров придонных вод в районе исследования методом описательной статистики приведены в таблице.

Основные статистические характеристики абиотических параметров придонных вод Гданьской впадины Балтийского моря по данным натурных измерений за период 2003–2016 гг.

Статистический показатель	Значение температуры, °С, и дата наблюдения	Значение солёности, psu, и дата наблюдения	Значение содержания кислорода, мл/л, и дата наблюдения	Значение содержания взвеси, мг/л, и дата наблюдения
Максимум	8,63; 27.10.2016 г.	14,44; 27.10.2016 г.	6,19; 27.05.2003 г.	1,71; 21.08.2015 г.
Верхний квартиль	7,50	13,47	2,90	1,13
Медиана	6,99; 04.08.2016 г.	12,50; 02.03.2006 г.	1,12; 05.03.2004 г.	0,69; 30.03.2016 г.
Нижний квартиль	5,95	12,04	0,41	0,43
Минимум	4,31; 27.05.2003 г.	11,09; 10.07.2013 г.	0,00; 05.07.2004 г. 15.10.2004 г. 21.10.2007 г. 13.07.2011 г.	0,20; 21.10.2007 г.
Среднее арифметическое	6,79	12,71	1,66	0,81

Полученные оценки позволяют еще раз подтвердить решающую роль адвективного фактора для экологического состояния придонных вод глубоководных впадин Балтийского моря. В условиях притока вод из западной части моря содержание растворенного кислорода скачкообразно повышается одновременно с увеличением солёности и температуры воды. Изменчивость концентрации взвешенного вещества не показала сколько-нибудь выраженной зависимости от других исследуемых параметров. Известно [6], что экстремум концентрации взвеси в придонном слое Гданьской впадины состоит исключительно из неживых и минеральных частиц. Таким образом, количество взвеси в придонных водах зависит в первую очередь от скорости придонных течений, а не от физических свойств воды [7].

Зафиксированная при мониторинговых наблюдениях интенсификация водообмена с Северным морем в 2015–2016 гг. [3] привела к изменению значений абиотических показателей придонного слоя Гданьской впадины в пределах ИЭЗ РФ (рис. 4).

Выполненные в акватории Гданьской впадины измерения показали, что термохалинные параметры в 2016 г. претерпели значительные изменения и превышали среднемноголетний уровень. В частности, годовой ход температуры в придонном слое можно разделить на три периода. Первый, длившийся с марта по июль,

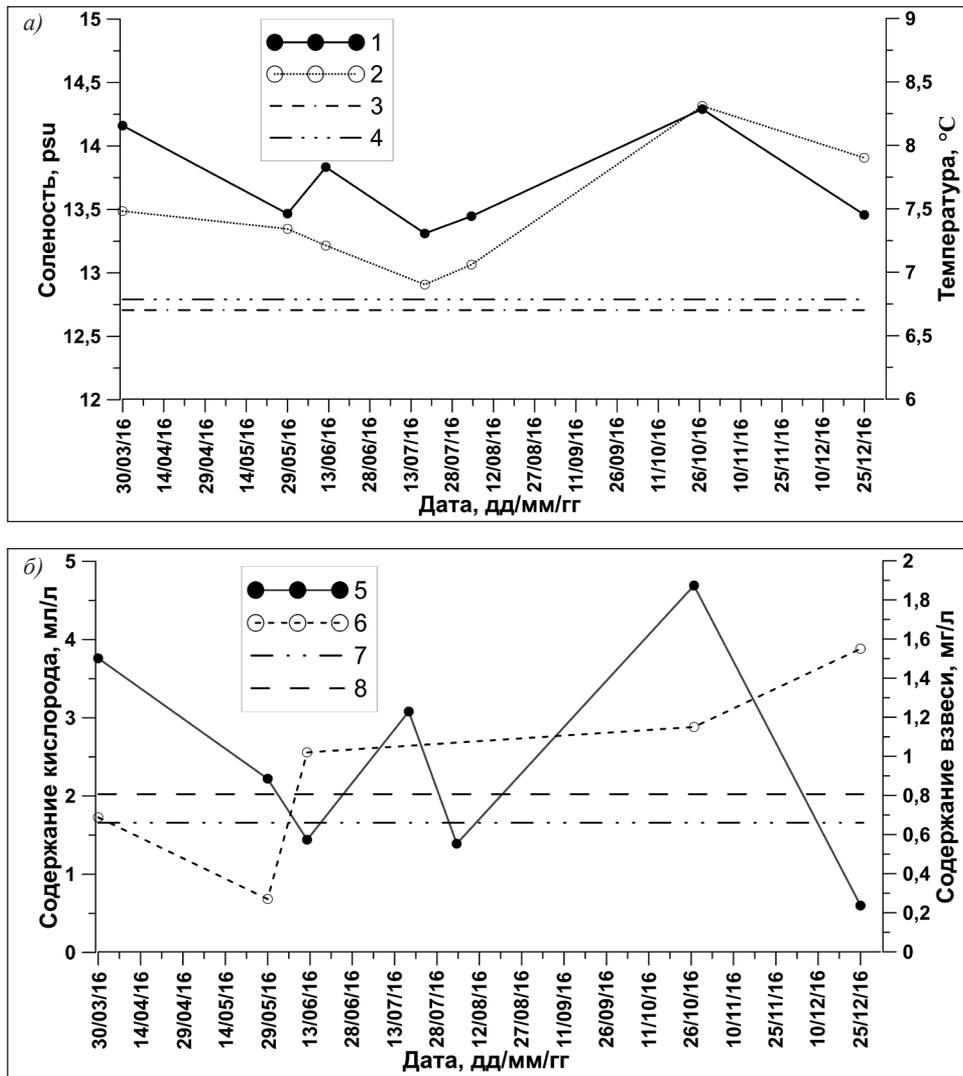


Рис. 4. Ход абиотических показателей в придонном слое Гданьской впадины в 2016 г.: а – солености и температуры; б – концентраций растворенного кислорода и взвешенного вещества на фоне средних значений тех же параметров за весь период наблюдений. Соответствие типа и содержания линий, приведенных на рисунке: 1 – ход солености; 2 – ход температуры; 3 – средняя соленость за период май 2003 г.–декабрь 2016 г.; 4 – средняя температура за период май 2003 г.–декабрь 2016 г.; 5 – ход концентрации растворенного кислорода; 6 – ход концентрации взвешенного вещества; 7 – средняя концентрация растворенного кислорода за период май 2003 г.–декабрь 2016 г.; 8 – средняя концентрация взвешенного вещества за период май 2003 г.–декабрь 2016 г.

характеризовался ее снижением с 7,48 до 6,90 °С. С июля до конца октября, когда было зафиксировано максимальное значение (8,31 °С), наблюдалось увеличение значений параметра. К концу года последовало падение температуры на 0,4 °С.

Ход солености в целом был подобен ходу температуры. Исключением является июнь, когда соленость повышается на 0,4 psu при снижении температуры. Среднегодовое значение составляет 13,7 psu. Максимум солености, температуры и содержания растворенного кислорода наблюдался в конце октября.

Изменение содержания растворенного кислорода придонных вод в 2016 г. имело квазипериодический характер, а его средний показатель оказался выше среднего уровня за весь период мониторинга на 0,8 мл/л. Годовая изменчивость этого параметра практически идентична ходу солености. Корреляция между двумя рядами составляет 0,68. Однако на графике выделяется один пик (12 июня), когда два значения разнонаправлены. Это, по-видимому, связано с тем, что измерения были выполнены в то время, когда Гданьскую впадину заполняла «старая» вода, вытесненная из глубинных слоев Борнхольмской впадины североморской водой.

Концентрация взвешенного осадочного вещества за 2016 г. изменялась по двум векторам: в первых двух кварталах наблюдалось уменьшение значения параметра до 0,27 мг/л в мае, а с конца июня концентрация взвеси испытывала стабильный рост до 1,55 мг/л в декабре.

Выводы

Анализ выполненных в 2016 г. инструментальных измерений ряда абиотических параметров придонных вод Гданьской впадины показал, что диапазон измеренных значений солености составил 13,31–14,44 psu, температуры – 6,90–8,63 °С. Концентрация кислорода изменялась от 0,60 до 4,69 мл/л, а концентрация взвеси – от 0,27 до 1,55 мг/л. Максимум всех абиотических показателей, кроме взвеси, наблюдался в конце октября. Концентрация взвеси достигла максимального значения к концу года. Минимум температуры и солености зафиксирован в июле, растворенного кислорода – в декабре, а концентрации взвешенного вещества – в мае.

Среднегодовые значения всех исследуемых параметров были выше их средних значений за весь период наблюдений – с мая 2003 г. по декабрь 2016 г. В частности, средняя соленость увеличилась на 1 psu, или 8 %, от среднемноголетнего значения, температура – на 0,66 °С (9,8 %), концентрация растворенного кислорода – на 0,79 мл/л (48 %), а взвешенного осадочного вещества – на 0,13 мг/л (16,5 %). Сопоставление данных натурных измерений показало различие в природе изменчивости термохалинных параметров и взвеси.

Исследование изменчивости абиотических показателей придонных вод Гданьской впадины подтвердило, что наступление благоприятных, с точки зрения геоэкологического благополучия, условий происходило после больших затоков североморских вод. Отсутствие больших затоков в период с 2003 по 2014 г. четыре раза приводило к полному исчезновению кислорода в придонных водах впадины. При интенсификации водообмена с Северным морем в 2016 г. среднегодовое содержание растворенного кислорода выросло до 2,45 мл/л, что значительно превышает необходимое для нормального функционирования донных сообществ.

Исследование выполнено при частичной поддержке госзадания «Изменения геологической среды шельфовых морей бассейна Атлантического океана под влиянием антропогенной нагрузки» (№ 0149-2016-0003). Авторы выражают благодарность ООО «Лукойл-КМН» (г. Калининград) за помощь в организации процесса получения данных, а также Немецкому океанографическому центру данных (DOD) и Федеральному морскому и гидрографическому агентству (BSH) за предоставление гидрологических данных мониторинговой сети MARNET (соглашение 2518/2016-075).

Литература

1. *Гидрометеорология* и гидрохимия морей. Т. 03. Балтийское море. Вып. 1. Гидрометеорологические условия: справочник. – СПб.: Гидрометеоздат, 1992. – 451 с.
2. *Гидрометеорология* и гидрохимия морей. Т. 03. Балтийское море. Вып. 2. Гидрохимические условия и океанологические основы формирования биологической продуктивности: справочник. – СПб.: Гидрометеоздат, 1994. – 435 с.
3. *Кречик В.А., Капустина М.В., Дубравин В.Ф.* Современное состояние придонного слоя Гданьской впадины вследствие влияния больших затоков в 2015–2016 годах // Тр. V Балт. морск. форума всерос. науч. конф. «Водные биоресурсы, аквакультура и экология водоемов», 23–24 мая 2017 г., Калининград. – Калининград: Изд-во ФГБОУ ВО «КГТУ», 2017. – С. 188–192.
4. *Музалевский А.А., Карлин Л.Н.* Экологические риски: теория и практика. – СПб.: РГГМУ, ВВМ, 2011. – 448 с.
5. *Ярвекюльг А.А., Гуделис В.К., Калейс М.В. и др.* Проблемы эвтрофикации Балтийского моря // Проблемы иссл. и матем. моделир. экосистемы Балтийского моря. Межд. проект «Балтика». Вып. 4. Основные тенденции эволюции экосистемы. – Л.: Гидрометеоздат, 1989. – С. 61–149.
6. *Beldowski J., Beldowska M., Kuliński K., Darecki M.* Vertical mercury, cadmium and lead distribution at two stratified stations in the Southern Baltic Sea // *Heavy Metals in the Environment*. Maralthe Books, 2012. – P. 237–256.
7. *Lund-Hansen L.C. & Skyum P.* Changes in hydrography and suspended particulate matter during a barotropic forced inflow // *Oceanologica Acta*. 1992. Vol. 15, No. 4. – P. 339–346.
8. *Mohrholz V., Naumann M., Nausch G., Krüger S., Gräwe U.* 2015. Fresh oxygen for the Baltic Sea. An exceptional saline inflow after a decade of stagnation // *Journal of Marine Systems*. 2015. Vol. 148. – P. 152–166.
9. *Naumann M., Mohrholz V., Nausch G.* Baltic inflow of December 2014 [Электронный ресурс] // The Leibniz Institute for Baltic Sea Research. [Официальный веб-сайт]. URL: <http://www.io-warnemuende.de/baltic-inflow-of-december-2014.html> (дата обращения: 10.04.2017).
10. *Piechura, J. and A. Beszczynska-Möller*, 2003: Inflow waters in the deep regions of the southern Baltic Sea – transport and transformation // *Oceanologia*. 2003. Vol. 45. – P. 593–621.
11. *Rak D.* The inflow in the Baltic Proper as recorded in January-February 2015 // *Oceanologia*. 2016. Vol. 58. – P. 241–247.