

ДИНАМИКА ГИПОКСИЙНЫХ ЗОН В БАЛТИЙСКОМ МОРЕ НА РУБЕЖЕ XX и XXI ВЕКОВ

Е. Н. Литина¹, Е. А. Захарчук^{1,2}, Н.А. Тихонова^{1,2}

¹Государственный океанографический институт им. Н.Н. Зубова, Санкт-Петербург, Россия

²Санкт-Петербургский государственный университет, Санкт-Петербург, Россия

DYNAMICS OF HYPOXIA IN THE BALTIC SEA AT THE TURN OF THE XX-XXI CENTURIES

E. N. Litina¹, E.A. Zakharchuk^{1,2}, N.A. Tikhonova^{1,2}

¹State Oceanographic Institute, St. Petersburg, Russia

²St. Petersburg state University, St. Petersburg, Russia

Оценивается межгодовая изменчивость гипоксических условий на рубеже XX–XXI веков в Балтийском море. Результаты сравниваются с исследованиями 1951–1988 годов. Обсуждаются возможные причины ухудшения кислородного режима.

The interannual variability of hypoxia conditions at the turn of the XX – XXI centuries in the Baltic Sea is estimated. The results are compared with studies of 1951–1988. The possible causes of the deterioration of the oxygen regime are discussed.

Введение.

Результаты исследования кислородного режима вод Балтийского моря, выполненного на основе судовых измерений во второй половине прошлого века (1958–1988 гг.), свидетельствуют, что в рассматриваемое тридцатилетие наблюдались периоды, когда в Балтийском море совсем не отмечалось зон сероводородного заражения (1964–1965 гг.), или же такие условия наблюдались в сравнительно небольших по площади районах моря (1967, 1973, 1974, 1977 гг.) [2, 7, 8, 9]. С 1968 по 1972 гг. и с 1980 по 1984 гг. в Балтике зоны сероводородного заражения имели по площади наибольшее развитие в рассматриваемый период, а в 1969, 1970, 1972 и 1980 гг. они наблюдались даже в западной части Финского залива, чего не отмечалось в другие годы. Причины таких изменений авторы связывали, преимущественно, с меняющимися условиями адвекции североморских вод и изменением интенсивности вертикального перемешивания [2]. Цель данной работы – оценить изменения гипоксических условий в Балтийском море в конце XX и начале XXI веков, сравнить полученные результаты с оценками кислородного режима, сделанными ранее во второй половине XX века, и обсудить возможные причины современных изменений гипоксических условий в Балтике.

Данные и методы.

В работе использовались судовые измерения содержания кислорода с 1989 по 2017 годы, температуры и солености - с 1979 по 2017 годы из базы данных DAS (<http://nest.su.se/das/>). Для исследования межгодовых изменений пространственного распределения районов с гипоксическими условиями, вся выборка станций разделялась на годовые массивы. Местоположение выбранных за каждый год станций отмечено на рисунке 2 в виде кружков. Если на какой-либо станции на одном или нескольких горизонтах в течение года отмечались гипоксические условия ($O_2 < 2$ мл/л), это место помечалось черным кружком, а при значениях $O_2 \geq 2$ мл/л – серым кружком (рис. 1-а). Для оценки вертикального распределения слоя гипоксии в пространстве и во времени оценивалось за каждый год изменение с глубиной содержания кислорода на разрезе, пересекающем Балтийское море с востока Финского залива до юго-западной части Балтики. Для каждой станции, включенной в разрез, для стандартных горизонтов за каждый год производилась выборка данных (с радиусом 5 км от положения станции) о концентрации кислорода. Для выбранных данных на стандартных горизонтах производилось их среднегодовое осреднение. Далее для каждого года строились распределенные по вертикали на всех станциях разреза среднегодовые значения концентрации кислорода. Горизонты, где отмечались гипоксические условия ($O_2 < 2$ мл/л), выделялись черным цветом (см. рис. 1-б). Для оценки вертикальных смещений верхней границы зоны гипоксии на станциях разреза проводился квантильный анализ рядов исходных значений концентрации кислорода, наиболее обеспеченных данными измерений. Для исследования изменений во времени стратификации вод

Балтийского моря на станциях, наиболее обеспеченных данными (ВУ2, ВУ15, ВУ31), строились ряды среднемесячных значений температуры (T , °C), солености (S , ‰) и плотности (ρ , кг/м³) на поверхности моря и в придонном слое. На основе полученных рядов оценивались вертикальные градиенты (ΔT , °C, ΔS , ‰ и $\Delta \rho$, кг/м³) как разность их значений между придонным и поверхностным слоем.

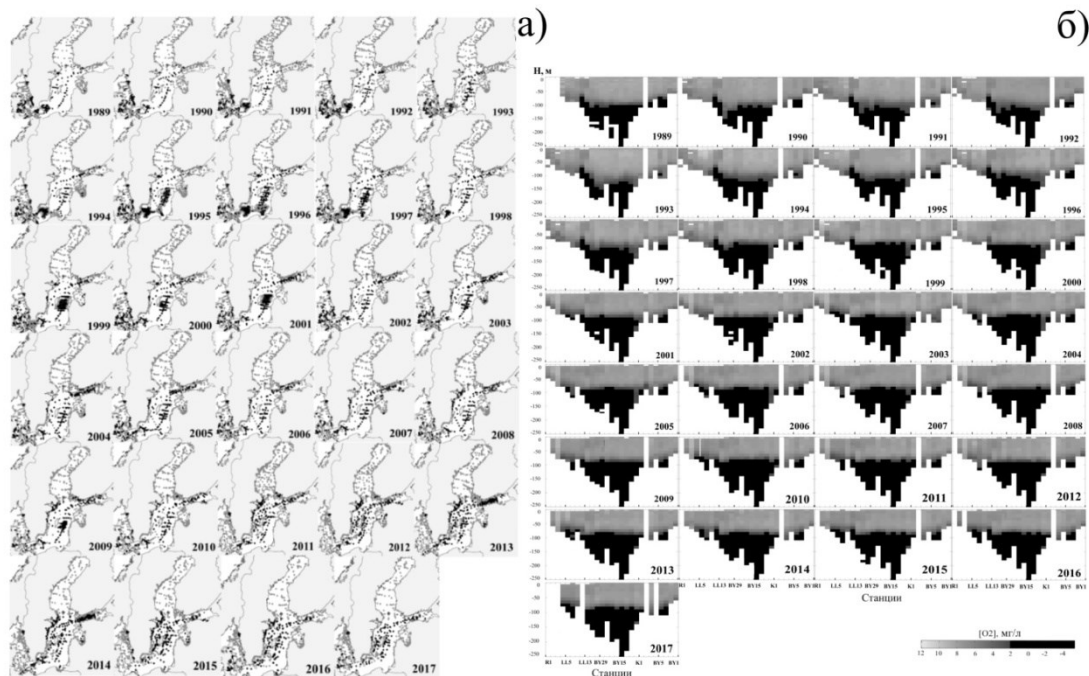


Рис. 1. Океанологические станции, где отмечались гипоксические условия ($O_2 < 2$ мл/л, черные кружки), и где значения $O_2 \geq 2$ мл/л (серые кружки) – а. Вертикальное распределение содержания растворенного кислорода в водах Балтийского моря на разрезе океанологических станций – б

Результаты и их обсуждение.

Полученные нами результаты анализа данных измерений содержания растворенного кислорода на океанологических станциях международного мониторинга в 1989 – 2017 годах, свидетельствуют о заметном ухудшении кислородного режима как всего Балтийского моря в целом, так и отдельных его акваторий по сравнению с предыдущим тридцатилетием (см. рис. 1). Причины этого большинство исследователей связывает с большой антропогенной нагрузкой на экосистему Балтийского моря и последствиями глобального потепления климата на Земле.

В последние двадцать лет, благодаря объединенным усилиям правительств прибалтийских государств и деятельности Хельсинской комиссии удалось снизить на воды Балтики биогенную нагрузку, поступающую от сельскохозяйственных, промышленных предприятий и муниципальных источников, однако концентрации биогенных веществ в ее водах остаются все еще высокими [15], и в рассматриваемый нами период не наблюдается уменьшения уровня эвтрофирования вод Балтийского моря [16].

Глобальное потепление проявляется в регионе Балтийского моря в виде аномально высоких среднегодовых значений температур воздуха, которых не наблюдалось за всю историю инструментальных измерений [3]. Повышается в последние десятилетия и средняя температура вод Балтийского моря, однако это повышение не выходит пока еще за рамки диапазона исторических изменений температуры Балтики, оцененных по данным инструментальных наблюдений с 1870-х годов по настоящее время [1, 3, 4, 6].

В работе [12] для выяснения причин ухудшения экологического состояния Балтики оценивалась корреляция между изменениями от года к году площади акватории, занятой синезелеными водорослями, и 29 предикторами, среди которых были: изменение площади гипоксических зон, различные характеристики температурного режима поверхности моря,

соленость приповерхностного слоя моря, прямое и рассеянное коротковолновое излучение в июле-августе, скорость ветра, концентрации основных биогенных веществ, продолжительность солнечного сияния в июле-августе. Ни с одним из перечисленных предикторов не была выявлена значимая корреляция. Авторы делают вывод, что в настоящее время нет правдоподобного объяснения сильных межгодовых колебаний в частоте поверхностных скоплений цианобактерий, наблюдаемых в Балтийском море, но, скорее всего, по их мнению, эти колебания определяются в основном биологическими процессами [12]. Таким образом, механизм формирования вспышек цветения цианобактерий, а вместе с ними и увеличение гипоксических зон, остается все еще недостаточно понятен. Можно предположить, что ухудшение кислородного режима Балтийского моря в последние десятилетия связано со значительным влиянием динамических процессов.

Потепление климата в регионе Балтийского моря сопровождается существенными изменениями его водообмена с Северным морем. После 1983 г. отмечается резкое сокращение случаев больших балтийских затоков. С 1880-х по начало 1980-х годов большие балтийские затоки наблюдались сравнительно часто – случаи их появления варьировались в основном от одного-двух раз в год до одного раза в 3-4 года [13]. После 1983 года частота больших балтийских затоков сократилась в 5 раз по сравнению с предыдущим тридцатилетием; интервал между ними, который еще называют периодом стагнации [11], стал составлять 10-11 лет. Не вызывает сомнения, что столь значительное уменьшение случаев больших затоков негативно сказывается на кислородном режиме Балтийского моря.

Результаты анализа межгодовых изменений термохалинных условий Балтийского моря свидетельствуют, что температура воды и в поверхностном и придонном слоях в последние десятилетия растет, в то время как в трендах поверхностной и придонной солёности отмечаются разнонаправленные тенденции: в поверхностном слое она уменьшается, а в придонном увеличивается. В придонных слоях глубоководных впадин (станции ВУ15 и ВУ31) увеличение солёности происходит не монотонно, а имеет ступенчатую или волнообразную структуру. До 1993 г. солёность у дна здесь уменьшалась быстрее, чем на поверхности, а далее она начала расти. В исследуемых районах открытой Балтики отмечается усиление стратификации водных масс, прежде всего за счет увеличения вертикального градиента солёности. Увеличение стратификации по нашим оценкам отмечается в последние десятилетия и в различных районах Финского залива [3]. Понятно, что усиление стратификации приводит к ослаблению процесса вертикальной турбулентной диффузии субстанции, что негативно сказывается на вертикальном обмене кислородом между поверхностным, глубинным и придонным слоями вод Балтики.

Результаты математического моделирования показывают также, что продолжающееся потепление климата в будущем приведет к дальнейшему ухудшению качества вод Балтийского моря: возрастанию вероятности возникновения максимальных значений неорганических форм азота и фосфора, росту цветения сине-зеленых водорослей, увеличению площади бескислородных и гипоксических зон [5, 10, 14].

Выводы.

В последние десятилетия, несмотря на усилия всех прибалтийских государств по улучшению экологического состояния Балтики, в море отмечается заметное ухудшение кислородного режима. Выполненный нами анализ данных судовых измерений содержания растворенного кислорода на станциях международного мониторинга в 1989 – 2017 гг. свидетельствует, что по сравнению с предыдущим тридцатилетием в Балтийском море отмечается увеличение площади акваторий с гипоксическими условиями, лимитирующими развитие жизни в глубинных и придонных слоях. В рассматриваемый нами период в открытой Балтике наблюдается также вертикальное развитие гипоксических условий. На это указывает устойчивое повышение верхней границы гипоксического слоя со 110 – 150 м в 1990 – 1997 гг., до 70 – 80 м в последние годы. Особенно заметные ухудшения кислородного режима отмечаются для Финского залива. Если в предыдущее тридцатилетие (1959-1988 гг.) гипоксические условия наблюдались только в самой западной части залива, и не во все годы, то, начиная с 1993 г., зоны гипоксии здесь отмечаются каждый год, распространяясь с течением времени дальше на восток залива, все чаще наблюдаясь в его центральной и восточной частях. Негативные кислородные условия вод Балтийского моря развиваются на фоне заметных изменений его гидрологического режима, которые, по-видимому, вызваны наблюдающимся потеплением климата: резкого сокращения случаев больших затоков

соленых и богатых кислородом североморских вод в Балтику и усилении стратификации ее водных масс.

Литература

1. Гидрометеорология и гидрохимия морей СССР. Т.3. Балтийское море. Вып.1. Гидрометеорологические условия. /Под ред. Ф.С. Терзиева, В.А. Рожкова, А.И. Смирновой. – СПб, Гидрометеоздат, 1992.
2. Гидрометеорология и гидрохимия морей СССР. Т.3. Балтийское море. Вып.2. Гидрохимические условия и океанологические основы формирования биологической продуктивности. /Под ред. Ф.С. Терзиева и др. - СПб, Гидрометеоздат, 1994.
3. Захарчук Е.А., Е. Н. Литина, Клеванцов Ю.П., Сухачев В.Н., Тихонова Н.А. Нестационарность гидрометеорологических процессов Балтийского моря в условиях меняющегося климата // Труды ГОИН. 2017. № 218. С. 6 – 62.
4. Литина Е. Н., Захарчук Е. А. Изменчивость термохалинных и гидрохимических характеристик на станциях международного мониторинга Балтийского моря во второй половине XX и начале XXI веков // Метеорология и гидрология. 2015. № 10. С. 54-64.
5. Рябченко В. А., Л.Н. Карлин, А. В. Исаев, Р. Е. Ванкевич, Т. Р. Еремина, М. С. Молчанов, О. П. Савчук. Модельные оценки эвтрофикации Балтийского моря в современном и будущем климате // Океанология. 2016. Т. 56. № 1. С. 41–50.
6. Assessment of Climate Change for the Baltic Sea Basin. Regional Climate Studies ISSN. Series Editors: H.-J. Bolle, M. Menenti, I. Rasool. 2008. Springer-Verlag Berlin Heidelberg. 118 p. ISBN: 978-3-540-72785-9.
7. Assessment of the effects of pollution of the natural resources of the Baltic Sea/ T. Melvasalo et. all. // Baltic Sea Environ. Proc. 1981, N 5B, p. 426.
8. Baltic Marine Environment Commission – Helsinki Commission -1987. First Periodic Assessment of the State of the Marine Environment of the Baltic Sea Area. Background Document. // Baltic Sea Environ. Proc. – 1987, N 17B.
9. Baltic Marine Environment Commission – Helsinki Commission -1990. Second Periodic Assessment of the State of the Marine Environment of the Baltic Sea, 1984-1988. Background Document // Baltic Sea Environ. Proc. – 1990, N 35B.
10. Gräwe U., R. Friedland, H. Burchard. The future of the western Baltic Sea: two possible scenarios // Ocean Dynamics August 2013, Volume 63, Issue 8, pp. 901-921.
11. Lepparanta M., Myrberg K. Physical Oceanography of the Baltic Sea. Springer/Praxis, Chichester, U.K. 2009. 378 pp.
12. Mati Kahru, Ragnar Elmgren, Emanuele Di Lorenzo, Oleg Savchuk. Unexplained interannual oscillations of cyanobacterial blooms in the Baltic Sea. Scientific Reports, 23 April 2018.
13. Matthaus W. The History of Investigation of Salt Water Inflows into the Baltic Sea – from the Early Beginning to Recent Results // Marine Science Reports No. 65. – Rostock-Warnemuende, Germany, Baltic Sea Res. Institute (IOW), 2006, 73 p.
14. Meier H.E.M., Andersson H.C., Eilola K. et al. Hypoxia in future climates: A model ensemble study for the Baltic Sea // Geophys. Res. Lett. 2011. V. 38, L24608, doi:10.1029/2011GL049929.
15. Raateoja M., Pitkänen H., Eremina T. Nutrients in the water. In: Gulf of Finland Assessment. pp. 94-113. Ed. by M. Raateoja and O. Setälä. Reports of the Finnish Environment Institute 27, 2016, 368 p.
16. Savchuk O.P. (a) Large-Scale Nutrient Dynamics in the Baltic Sea, 1970–2016. Front. Mar. Sci., 22 March 2018.