

## ДИНАМИКА ГИПОКСИЙНЫХ ЗОН В БАЛТИЙСКОМ МОРЕ НА РУБЕЖЕ XX И XXI ВЕКОВ

© 2020 г. Е. Н. Литина<sup>a, \*</sup>, Е. А. Захарчук<sup>a, b</sup>, Н. А. Тихонова<sup>a, b</sup>

<sup>a</sup>Государственный океанографический институт им. Н.Н. Зубова,  
Санкт-Петербургское отделение, Санкт-Петербург, 199397 Россия

<sup>b</sup>Санкт-Петербургский Государственный университет,  
Санкт-Петербург, 199034 Россия

\*e-mail: warzuga@yandex.ru

Поступила в редакцию 19.01.2019 г.

После доработки 19.01.2019 г.

Принята к публикации 12.11.2019 г.

На основе анализа данных судовых измерений концентрации кислорода в Балтийском море на станциях международного мониторинга оценена межгодовая изменчивость кислородного режима в конце XX—начале XXI вв. (1989–2017 гг.). Полученные результаты сравниваются с подобными исследованиями, сделанными в период 1951–1988 гг. Отмечено увеличение площади акваторий с гипоксией условиями и усиление их вертикального развития. Особенно заметные ухудшения кислородного режима наблюдаются для Финского залива. Если в предыдущее тридцатилетие (1959–1988 гг.) гипоксические условия наблюдались только в 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, все чаще появляясь в его центральной и восточной частях. На основе анализа изменений температуры и солености выявлено увеличение разностей плотности морской воды в Балтийском море между поверхностным и придонным слоями. Сделано предположение, что одна из возможных причин ухудшения кислородного режима Балтики в последние десятилетия может быть связана с усилением стратификации ее водных масс.

*Ключевые слова:* Балтийское море, гипоксические условия, межгодовая изменчивость, квантильный анализ, стратификация.

DOI: 10.31857/S0321059620030098

### ВВЕДЕНИЕ

Гипоксические условия в природных водах выделяются, когда концентрация растворенного кислорода ( $O_2$ ) в них становится  $<2$  мл/л, что приводит к гибели обитающих в водной среде живых организмов [2]. Такие условия формируются из-за эвтрофирования водного бассейна — антропогенного или естественного обогащения водной среды биогенными элементами, вследствие этого растет биологическая продуктивность акватории. Эвтрофирование водоема приводит к цветению водорослей, из-за чего затрудняется процесс фотосинтеза растений в водной толще, что в свою очередь влечет за собой их отмирание, опускание на дно и увеличение там количества органического вещества, на окисление которого расходуется  $O_2$ . Это приводит к еще большему увеличению площади гипоксических зон, денитрификации и высвобождению неорганического фосфора [12]. При критическом накоплении на дне органического вещества могут возникать анаэробные

условия, при которых происходит образование сероводорода. Главное условие возникновения анаэробных зон в море, по оценкам О.А. Алекина и Ю.И. Ляхина [1], — превышение скорости потребления  $O_2$  на биохимическое окисление органических веществ над скоростью его поступления при слабой вертикальной циркуляции вод и высокой первичной продукции.

Особенности формирования режима  $O_2$  в Балтийском море связаны с комплексом физико-географических, гидродинамических и биохимических факторов, определяющих поступление, перенос и трансформацию субстанции в море. Наиболее значимые из них: ограниченный водообмен с Северным морем, материковый сток, высокий уровень антропогенной нагрузки, абсорбция кислорода из атмосферы, а также его адекватная и турбулентная диффузия в водной толще [2].

Результаты исследования кислородного режима вод Балтийского моря, выполненного на основе судовых измерений во второй половине XX в.

(1958–1988 гг.), представлены в работах [2, 5–7]. Анализ этих результатов свидетельствует о том, 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.). С 1968 по 1972 г. и с 1980 по 1984 г. в Балтике площади зоны сероводородного заражения наиболее увеличивались, а в 1969, 1970, 1972 и 1980 гг. они наблюдались даже в западной части Финского залива, чего не было в другие годы. Причины таких изменений авторы исследования связывали, преимущественно, с меняющимися условиями адвекции североморских вод и изменением интенсивности вертикального перемешивания [2].

В последние двадцать лет благодаря объединенным усилиям правительств прибалтийских государств и деятельности Хельсинской комиссии, удалось снизить биогенную нагрузку на воды Балтики от сельскохозяйственных, промышленных предприятий и хозяйственно-бытовых источников, однако концентрации биогенных веществ в ее водах остаются все еще высокими [4, 10], и в отмеченный период не наблюдается уменьшения уровня эвтрофирования вод Балтийского моря [11].

В работе [8] для выяснения причин ухудшения экологического состояния Балтики оценивалась корреляция между изменениями от года к году площади акватории, занятой сине-зелеными водорослями, и 29-ю предикторами, среди которых: изменение площади гипоксических зон, различные характеристики температурного режима на 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 выявлена значимая корреляция. Авторы исследования делают вывод, что в настоящее время нет правдоподобного объяснения сильным межгодовым колебаниям частоты появления поверхностных скоплений цианобактерий, наблюдаемых в Балтийском море, но по мнению авторов, эти колебания определяются, скорее всего, биологическими процессами [8]. Таким образом, причины вспышек цветения цианобактерий, а вместе с этим и увеличения гипоксических зон остаются все еще недостаточно понятными.

Цель данной работы – оценить изменения гипоксических условий в Балтийском море в конце XX и начале XXI вв., сравнить полученные результаты с оценками кислородного режима, сделанными ранее во второй половине XX в., и обсу-

дить возможные причины современных изменений гипоксических условий в Балтике.

## ДАННЫЕ И МЕТОДЫ

В работе использовались данные судовых измерений содержания  $O_2$  с 1989 по 2017 г., а также температуры и солености вод в Балтийском море с 1979 по 2017 г., которые получены из международной базы данных DAS. Для исследования межгодовых изменений районов распространения гипоксических условий вся выборка станций, на которых проводились измерения содержания  $O_2$  в водах Балтики, разделялась на годовые массивы. Если на какой-либо станции на одном или нескольких горизонтах в течение года отмечались гипоксические условия (содержание  $O_2 < 2$  мл/л), это место помечалось черным кружком, а при содержании  $O_2 \geq 2$  мл/л – серым кружком.

Для оценки вертикального распределения гипоксических условий оценивалось за каждый год изменение с глубиной содержания  $O_2$  на разрезе, пересекающем Балтийское море с ЮЗ на СВ (рис. 1).

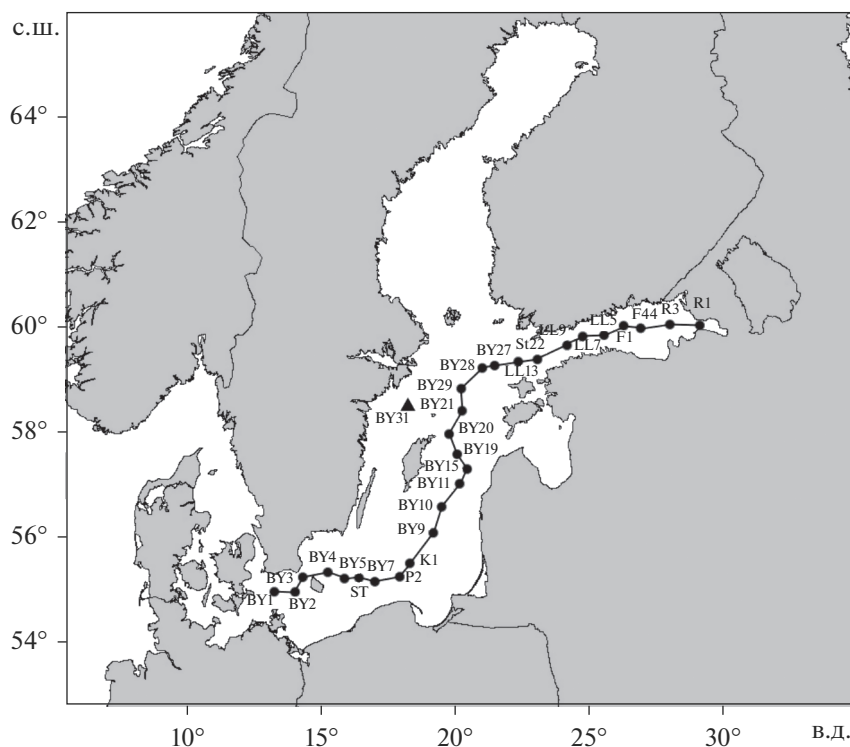
Для каждой станции на разрезе для стандартных горизонтов за каждый год проводилась выборка данных (с радиусом 5 км от положения станции) о концентрации  $O_2$ . Для выбранных данных на стандартных горизонтах проводилось их осреднение за год. Далее для каждого года и всех станций разреза строились вертикальные распределения среднегодовых концентраций  $O_2$ .

Для оценки вертикальных смещений верхней границы зоны гипоксии проводился квантильный анализ рядов исходных значений концентрации кислорода на станциях разреза, наиболее обеспеченных данными измерений. Рассчитывались 5 квантилей:  $x_{\min}, x_{0.25}, x_{0.5}, x_{0.75}, x_{\max}$  ( $x_{\min}, x_{\max}$  – крайние члены ранжированного ряда  $x_i, i = 1, n$  – количество членов ряда,  $x_{0.5}$  – медиана (Me)):

$$Me = \begin{cases} x_{(n+1)/2} & \text{при нечетном } n \\ 0.5 (x_{n/2} + x_{n/2+1}) & \text{при четном } n, \end{cases}$$

$x_{0.25}, x_{0.75}$  – медианы левой и правой половины ранжированного ряда.

Для исследования изменений во времени стратификации вод Балтийского моря на трех станциях, наиболее обеспеченных данными (ВУ2, ВУ15, ВУ31), строились ряды среднемесячных значений температуры ( $T, ^\circ C$ ), солености ( $S, \text{‰}$ ) и плотности ( $\rho, \text{кг/м}^3$ ) на поверхности моря и в придонном слое. На основе полученных рядов оценивались вертикальные разности  $\Delta T, ^\circ C, \Delta S, \text{‰}$  и  $\Delta \rho, \text{кг/м}^3$ , между придонным и поверхностным слоем.



**Рис. 1.** Картограмма местоположения разреза, пересекающего Балтийское море с ЮЗ на СВ. Кружки – океанографические станции разреза. Треугольник – положение станции ВУ-31.

## РЕЗУЛЬТАТЫ

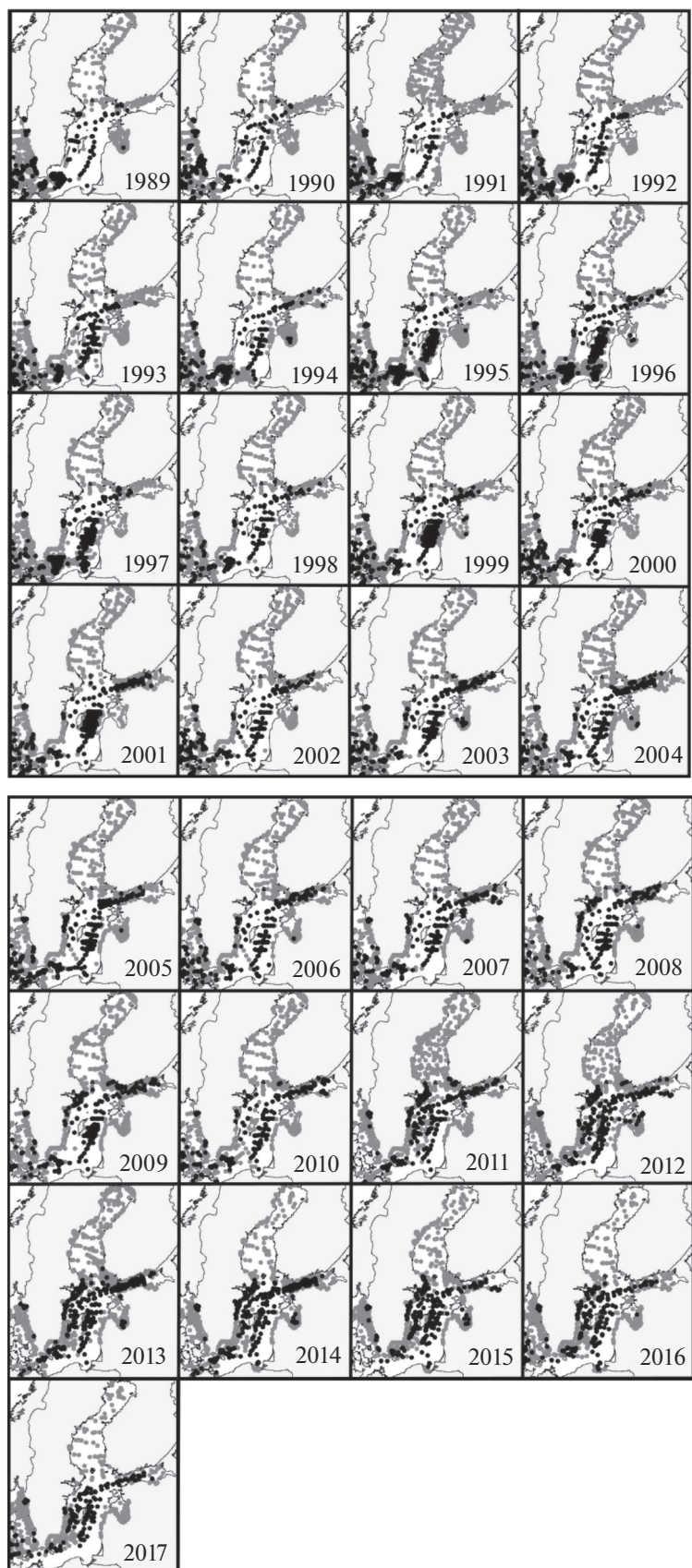
На рис. 2 показано местоположение океанографических станций в отдельные годы, на которых отмечались гипоксические условия (черные кружки) в Балтийском море в 1989–2017 гг. Можно видеть, что в этот период наблюдается увеличение площади распространения гипоксических зон по сравнению с предыдущим тридцатилетием [2, 5–7]. Например, если в 1959–1988 гг. гипоксические условия в Слупском канале, соединяющем Борхольмский бассейн и Гданьскую впадину, наблюдались только в 1968 г., а на границе между Ботническим заливом и открытой Балтикой они вообще не наблюдались [2], то в рассматриваемый период в этих районах неблагоприятные кислородные условия отмечаются в большинстве случаев (рис. 2).

Особенно заметные ухудшения кислородного режима отмечены для Финского залива. Если в предыдущее тридцатилетие (1959–1988 гг.) гипоксические условия наблюдались только в крайней западной части залива и не во все годы, то с 1993 г. – каждый год, распространяясь с течением времени дальше на восток залива, все чаще – в центральной и восточной частях (рис. 2).

Для Рижского залива характерна смена периодов наличия и отсутствия зон гипоксии. Самый долгий период отсутствия случаев гипоксических условий здесь продолжался 4 года (с 1990 по 1993 г.); и, наоборот, наибольшие многолетние периоды, когда в Рижском заливе встречались гипоксические условия, составили 7 лет (с 2002 по 2008 г.) и 5 лет (с 2012 по 2016 г.).

На рис. 3 показаны межгодовые изменения кислородных условий на разрезе, пересекающем Балтийское море.

С 1990 по 1997 г. отмечается улучшение кислородных условий на станциях разреза в открытой части моря, что проявляется в увеличении содержания кислорода в верхнем квазиоднородном слое до 9–11 мг/л и в заглуплении верхней границы гипоксической зоны в центральной Балтике, а также в исчезновении гипоксических условий на большинстве станций в южной и юго-западной части моря. Особенно благоприятные кислородные условия в этот период складывались в северной части открытой Балтики, где верхняя граница гипоксического слоя в отдельные годы заглуплялась до 140–150 м (станции ВУ28, ВУ29). После 1997 г. кислородные условия в открытой Балтике стали ухудшаться, и эта тенденция продолжается



**Рис. 2.** Местоположение океанологических станций в Балтийском море, на которых обнаружены гипоксические условия (черные кружки), и где таких условий не отмечалось (серые кружки).

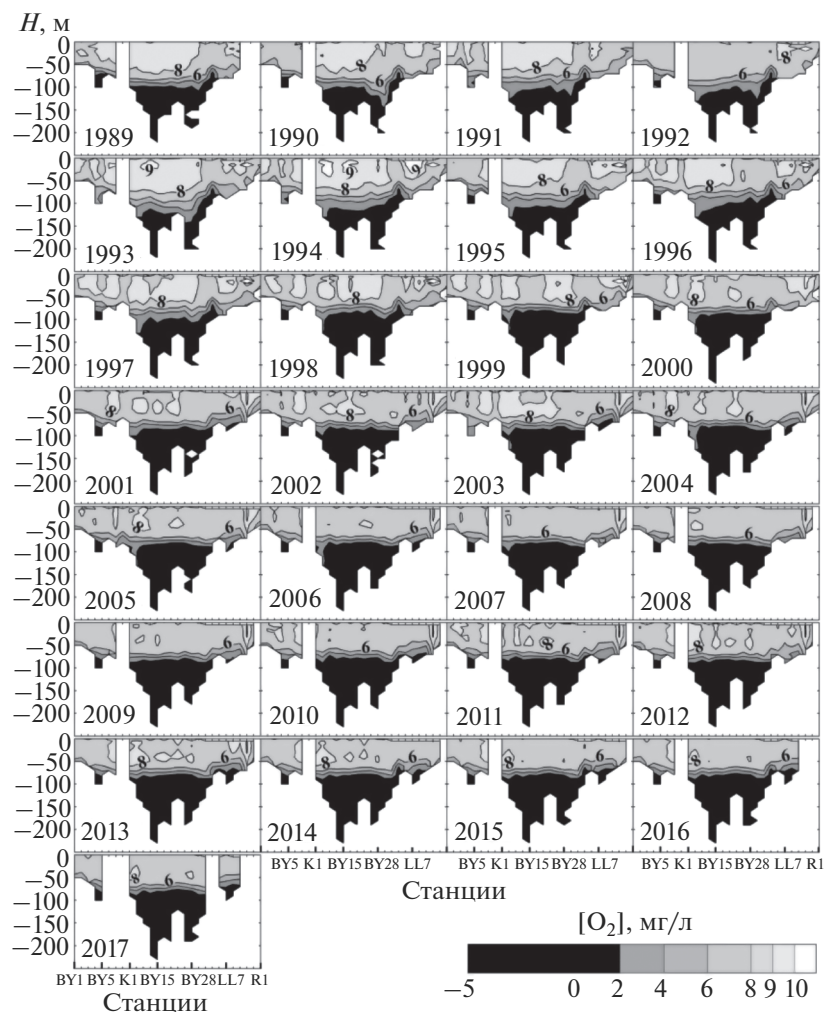
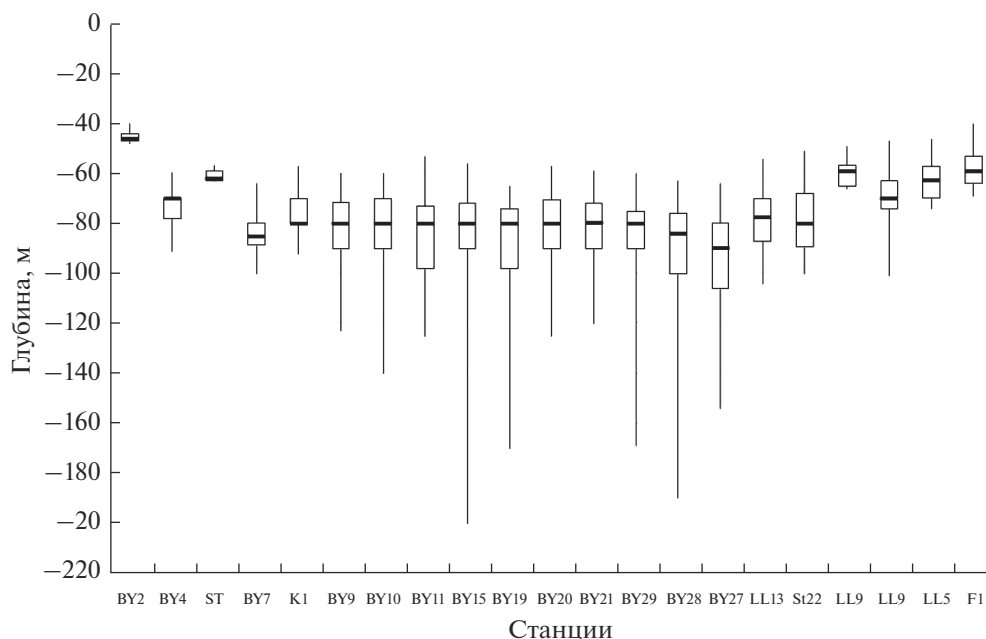


Рис. 3. Вертикальное распределение содержания растворенного  $O_2$  в водах Балтийского моря на разрезе океанологических станций. Черный цвет – гипоксические условия.

до настоящего времени. На это указывают заметное уменьшение содержания  $O_2$  в поверхностном слое и стабильное повышение верхней границы гипоксического слоя, которая в последние годы стала достигать 80–70 м. Например, если в юго-западной части моря (ст. BY2) в середине 1990-х гг. среднегодовые концентрации  $O_2$  в поверхностном слое достигали 8.3–8.7, в центральной части открытой Балтики (BY15) – 8.4–8.8, на западе Финского залива (LL9) 8.5–10.1 мг/л, то в 2015–2017 гг. эти оценки понизились, соответственно, до значений 7.5–7.6, 7.6–7.7 и 7.4–7.5 мг/л.

Результаты квантильного анализа вертикальных смещений верхней границы гипоксического слоя свидетельствуют, что в юго-западной части Балтики среднее медианное значение (Me) этой границы наблюдается на глубине 45 м в Аркон-

ском бассейне и на глубинах 62–70 м в Борнхольском бассейне (рис. 4). В центральной Балтике Me колебаний верхней границы гипоксии отмечается на больших глубинах (78–89 м). В Финском заливе Me соответствует глубинам 59–70 м. Значения  $x_{\min}$  во впадинах открытой Балтики соответствуют глубинам придонных горизонтов. Это связано с тем, что после случаев больших балтийских затоков происходит сравнительно кратковременная аэрация придонных вод, когда гипоксические условия исчезают. Например, по оценкам М. Мейера с соавторами [9], в придонном слое Готландской впадины после трех последних затоков гипоксические условия исчезали на период 1–6 мес. Оценки  $x_{\max}$  показывают, что максимальные подъемы верхней границы гипоксической зоны достигают глубин 40–50 м в Фин-



**Рис. 4.** Квантильные характеристики вертикальных смещений верхней границы гипоксического слоя на станциях разреза в Балтийском море.

ском заливе, 40–60 м в юго-западной части Балтийского моря и 50–65 м в открытой Балтике.

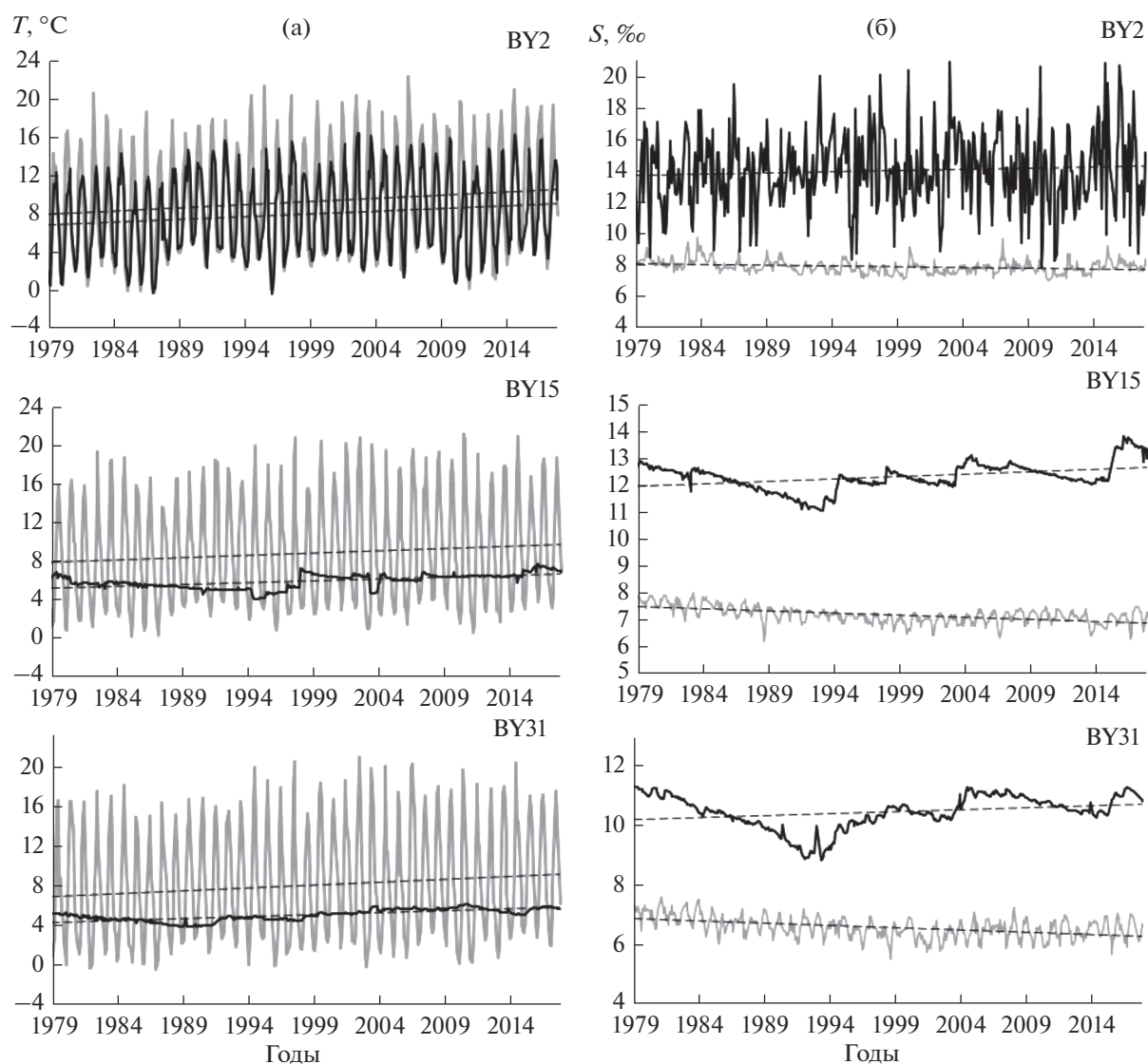
На рис. 5 показаны изменения температуры и солёности вод в поверхностном и придонном слоях на трех океанографических станциях в период с 1979 по 2017 г. в открытой Балтике, а на рис. 6 – вертикальные разности температуры, солёности и плотности вод между поверхностным и придонным слоем на этих станциях. Температура воды и в поверхностном, и в придонном слоях растет, в то время как в трендах поверхностной и придонной солёности отмечаются разнонаправленные тенденции: в поверхностном слое она уменьшается, а в придонном увеличивается (рис. 6). Хорошо видно, что в придонных слоях глубоководных впадин (станции ВУ15 и ВУ31) увеличение солёности происходит не монотонно, а имеет ступенчатый или волнообразный характер. До 1993 г. солёность у дна здесь уменьшалась быстрее, чем на поверхности, а далее она начала расти. По рис. 6 видно, что во всех трех районах открытой Балтики отмечается усиление стратификации водных масс, прежде всего за счет увеличения вертикального градиента солёности. На это указывает увеличение разности плотности в линейных трендах с 1979 по 2017 г. между поверхностным и придонным слоями, которая составляет от

0.7 кг/м<sup>3</sup> на станции ВУ2, до 1.1 кг/м<sup>3</sup> на станции ВУ15.

Увеличение стратификации, по оценкам авторов статьи, отмечается в последние десятилетия и в различных районах Финского залива [3], где такие же трендовые оценки увеличения разности плотности с 1988 по 2014 г. составляли от 0.5 кг/м<sup>3</sup> в западной до 1.1 кг/м<sup>3</sup> в центральной частях залива. Понятно, что усиление стратификации приводит к ослаблению вертикальной турбулентной диффузии субстанции, что негативно сказывается на вертикальном обмене O<sub>2</sub> между поверхностным, глубинным и придонным слоями вод Балтики. Не исключено, что эти изменения стратификации могут быть одной из причин ухудшения кислородного режима Балтийского моря.

## ВЫВОДЫ

Выполненный анализ данных судовых измерений содержания растворенного O<sub>2</sub> на станциях международного мониторинга в 1989–2017 гг. свидетельствует о том, что по сравнению с предыдущим тридцатилетием в Балтийском море отмечается заметное ухудшение кислородного режима как всего Балтийского моря, так и отдельных его акваторий. На это указывает увеличение площади распространения гипоксических зон, уменьшение содержания O<sub>2</sub> в верхнем квазиоднородном слое



**Рис. 5.** Изменения среднемесячных значений температуры  $T$  (а) и солёности воды  $S$  (б) в слое 0–5 м (серая линия) и в глубинном слое (черная линия) на станциях BY2, BY15 и BY31. Пунктирная линия – линейный тренд.

и стабильное повышение верхней границы гипоксического слоя в открытой Балтике с глубин 110–150 м в 1990–1997 гг. до 70–80 м в последние годы. Особенно выраженные негативные изменения кислородных условий отмечаются в Финском заливе. Если в предыдущее тридцатилетие (1959–1988 гг.) гипоксические условия наблюдались только в некоторые годы в самой западной части залива, то с 1993 г. зоны гипоксии здесь отмечаются уже каждый год и с течением времени начинают появляться все чаще в центральной и восточной частях Финского залива. Отмеченное ухудшение кислородного режима Балтики происходит на фоне существенного изменения термохалинной структуры ее водных масс. Выполнен-

ный в данной работе анализ многолетних изменений температуры и солёности вод в открытой части Балтийского моря свидетельствует об увеличении температуры в поверхностном и придонном слоях моря, уменьшении солёности в поверхностном слое и ее увеличении у дна. С выявленными изменениями термохалинной структуры связано усиление стратификации водных масс Балтийского моря прежде всего за счет увеличения вертикального градиента солёности. На это указывает увеличение разности плотности в линейных трендах с 1979 по 2017 г. между поверхностным и придонным слоями. Усиление стратификации может быть одной из причин

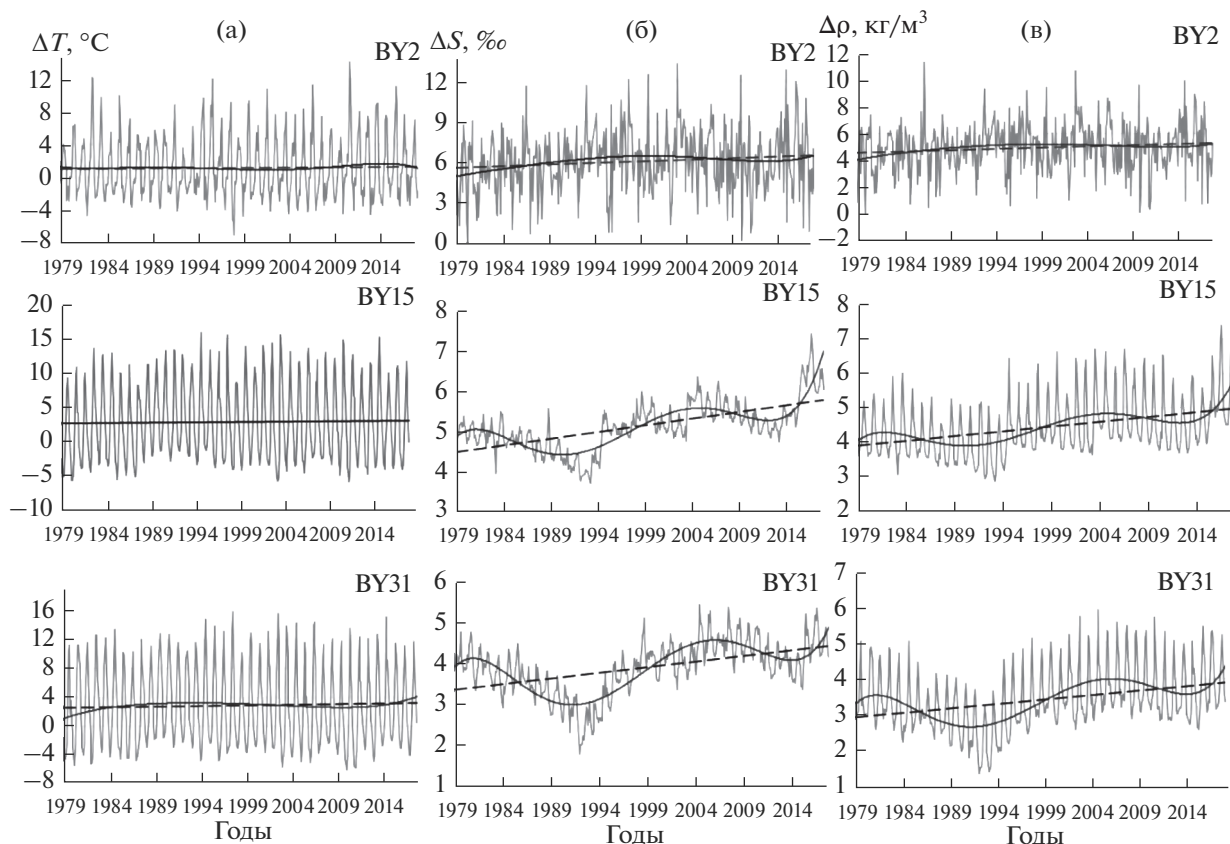


Рис. 6. Вертикальные градиенты температуры  $\Delta T$  (а), солёности  $\Delta S$  (б) и плотности  $\Delta \rho$  (в), рассчитанные для станций BY2, BY15 и BY31. Пунктирная линия – линейный, сплошная черная – полиномиальный тренд.

ухудшения кислородного режима Балтийского моря в последние десятилетия.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Алевкин О.А., Ляхин Ю.И. Химия океана. Л.: Гидрометеоздат, 1984. 344 с.
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. СПб.: Гидрометеоздат, 1994.
3. Захарчук Е.А., Литина Е.Н., Клеваницов Ю.П., Сухачев В.Н., Тихонова Н.А. Нестационарность гидрометеорологических процессов Балтийского моря в условиях меняющегося климата // Тр. ГОИН. 2017. № 218. С. 6–62.
4. Литина Е.Н., Захарчук Е.А. Изменчивость термohалинных 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. Assessment of the effects of pollution of the natural resources of the Baltic Sea / Eds T. Melvasalo et. al // Baltic Sea Environ. Proc. 1981. № 5B. P. 426.
6. 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. № 17B.
7. 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. № 35B.
8. Kahru M., Elmgren R., Savchuk O.P. Changing seasonality of the Baltic Sea // Biogeosci. 2016. № 3. P. 1009–1018.
9. 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. <https://doi.org/10.1029/2011GL049929>
10. Neumann T., Eilola K., Gustafsson B., Muller-Karulis B., Kuznetsov I., Meier H.E.M., Savchuk O.P. Extremes of temperature, oxygen and blooms in the Baltic Sea in a changing climate // AMBIO 41. 2012. № 6. P. 574–585.
11. Savchuk O.P. Large-scale dynamics of hypoxia in the Baltic Sea // Berlin: Springer Verlag, 2010. P. 137–160.
12. Savchuk O.P. Large-Scale Nutrient Dynamics in the Baltic Sea, 1970–2016 // Front. Mar. Sci. 2018. № 5. P. 1–20.