

УДК 551.465 (262.5)

ДОЛГОПЕРИОДНАЯ ИЗМЕНЧИВОСТЬ РАСТВОРЕННОГО КИСЛОРОДА И ТЕМПЕРАТУРЫ ВЕРХНЕГО СЛОЯ ВОД ЧЕРНОГО МОРЯ

© 2019 г. А. Б. Полонский, А. А. Котолупова

*Институт природно-технических систем, Севастополь, Россия
e-mail: apolonsky5@mail.ru, ogorodovaa.a@mail.ru*

Поступила в редакцию 23.03.2015 г.

После доработки 03.06.2016 г.

На основе архивных данных океанографического банка Института природно-технических систем анализируется внутри- и межгодовая изменчивость растворенного кислорода и температуры верхнего слоя глубоководной и северо-западной частей Черного моря за период с 1923 по 2013 гг. Сезонные колебания концентрации растворенного кислорода и температуры противофазны. В среднем за весь анализируемый период концентрация растворенного кислорода максимальна в зимний период в северо-западной части моря и минимальна — в открытой его части летом. Амплитуда сезонных вариаций составляет более 50 $\mu\text{моль/л}$. В целом это согласуется с ранее опубликованными результатами. Однако в отдельные периоды продолжительностью в 20–30 лет сезонный ход существенно изменяется. Это связано с квазипериодической изменчивостью концентрации кислорода с типичным временным масштабом в несколько десятков лет, по-разному проявляющейся в различные сезоны и в разных частях моря.

Ключевые слова: междесятилетняя изменчивость растворенного кислорода, верхний перемешанный слой, северо-западная и глубоководная части Черного моря

DOI: <https://doi.org/10.31857/S0030-15745922-32>

ВВЕДЕНИЕ

Гидролого-гидрохимическая структура вод Черного моря уникальна. Главной ее особенностью является наличие кислорода только в верхнем слое — от поверхности приблизительно до нижней границы холодного промежуточного слоя (ХПС), где его концентрация падает до 10 $\mu\text{моль/л}$ и менее. Глубже ХПС кислород отсутствует, а одновременно с ростом температуры в промежуточных и глубинных водах увеличивается содержание сероводорода. В центральных районах моря сероводород повсеместно обнаруживается, начиная приблизительно с глубины 125 м, в окраинных районах — с 225 м [17]. Проблемы взаимодействия аэробной и анаэробной зон, изменения положения верхней границы сероводорода, наличие зоны сосуществования кислорода с сероводородом (так называемого, С-слоя), а также проблемы водообмена между прибрежными и открытыми

частями акватории на протяжении многих десятилетий находились в центре внимания исследователей, занимающихся изучением Черного моря. Изменения содержания растворенного в верхней толще вод кислорода под воздействием гидрологических и антропогенных факторов в значительной степени определяет условия функционирования водных экосистем. Поэтому этой проблеме посвящено большое количество работ.

Первые систематические сведения о содержании кислорода в водах Черного моря были получены сотрудниками Севастопольской биологической станции в 1923 году. За прошедший с 1923 г. период был собран обширный материал, который позволил подробно рассмотреть вертикальное распределение и пространственно-временную изменчивость растворенного кислорода в широком диапазоне масштабов. Опубликован ряд работ, из которых следует, что верхняя 40–50-метровая толща вод Черного

моря, как правило, хорошо насыщена кислородом. Слой от 50 до 75 м характеризуется наиболее высокими отрицательными градиентами кислорода. Глубже содержание кислорода продолжает понижаться (хотя и с меньшей скоростью) и доходит до предельно малых концентраций на глубинах 100–200 м [8, 9, 11, 23, 27, 30].

Сезонная изменчивость содержания растворенного кислорода в целом описана достаточно полно по данным наблюдений, выполненных до середины 1980-х годов [11, 15, 28, 29]. Автором работы [28] проанализировано 22 250 наблюдений на стандартных горизонтах за период с 1948 по 1963 г. и описаны изменения пространственного распределения кислорода в водах Черного моря в зависимости от времени года. Построены сезонные поля распределения кислорода на поверхности, горизонтах 50, 100 и 200 м. Проанализирован годовой ход средних по акватории моря величин абсолютного и относительного содержания кислорода на разных глубинах. Выявлено, что в верхнем слое основную роль в формировании кислородного режима играют температурные условия, биохимические факторы, а также синоптическая обстановка в придном слое атмосферы, определяющая интенсивность турбулентного перемешивания деятельного слоя. В период с декабря по март, когда в верхнем слое преобладает конвективное перемешивание, величина содержания растворенного кислорода мало меняется от поверхности до глубины порядка 50 м. Весенний прогрев приводит к снижению содержания кислорода в верхнем перемешанном слое (ВПС от поверхности до глубины — 10–15 м). Интенсивное развитие фотосинтетических процессов весной и летом приводит к высокому насыщению воды кислородом. В ВПС этот процесс выражен наиболее отчетливо. При этом из-за достаточно высокой температуры ВПС в этот период абсолютное содержание растворенного кислорода в верхнем слое мало [28]. Опубликовано множество работ, которые анализируют отдельные съемки в Черном море за разные периоды времени [7, 8, 10, 13, 15, 32]. Проанализированы междесятилетние изменения концентрации растворенного кислорода для отдельных районов Черного моря [23, 24].

В настоящее время большой интерес вызывает взаимодействие кислородной, суб-

кислородной и бескислородной зон, а также характеристики долгопериодной изменчивости поля кислорода на акватории Черного моря [31–35, 37]. В работе [32] проведен анализ данных с 1960 по 1995 г., который выявил некоторые новые элементы эволюции химической структуры Черного моря: увеличение питательных веществ в бескислородной зоне, уменьшение запасов кислорода в верхнем слое и изменения в толщине субкислородной зоны. Вместе с тем, по данным Атласа [20], во второй половине XX-го века отмечалась выраженная тенденция повышения содержания растворенного кислорода в верхнем слое вод Черного моря. По данным авторов работы [22], температурный режим верхнего слоя моря характеризуется наличием квазипериодических колебаний с характерным временным масштабом в несколько десятков лет. Учитывая тесную связь растворенного кислорода и температуры морской воды, аналогичные колебания должны наблюдаться и во временном ходе характеристик кислорода.

В настоящей работе с целью выявления долгопериодной изменчивости поля кислорода в Черном море за период с 1923 по 2013 г., рассматривался верхний 10-метровый слой. Этот слой наиболее сильно подвержен климатическим изменениям. Эти изменения проявляются прежде всего в температуре верхнего слоя, которая определяет растворимость кислорода и изменяется в широких пределах. Северо-западная и глубоководная части Черного моря рассматриваются в отдельности, т.к. кислородный режим этих регионов существенно различается. Северо-западная часть Черного моря наряду с атмосферным воздействием наиболее подвержена влиянию речного стока и антропогенным нагрузкам. На акваторию шельфа поступает около 80% суммарного речного стока в Черное море, что приводит к периодическому обострению экологической обстановки и сопутствующей изменчивости гидролого-гидрохимических характеристик северо-западного шельфа [2, 6, 14, 16]. Открытые районы Черного моря в значительно меньшей степени подвержены прямому воздействию речного стока и характеризуются меньшей горизонтальной неоднородностью гидролого-гидрохимических характеристик.

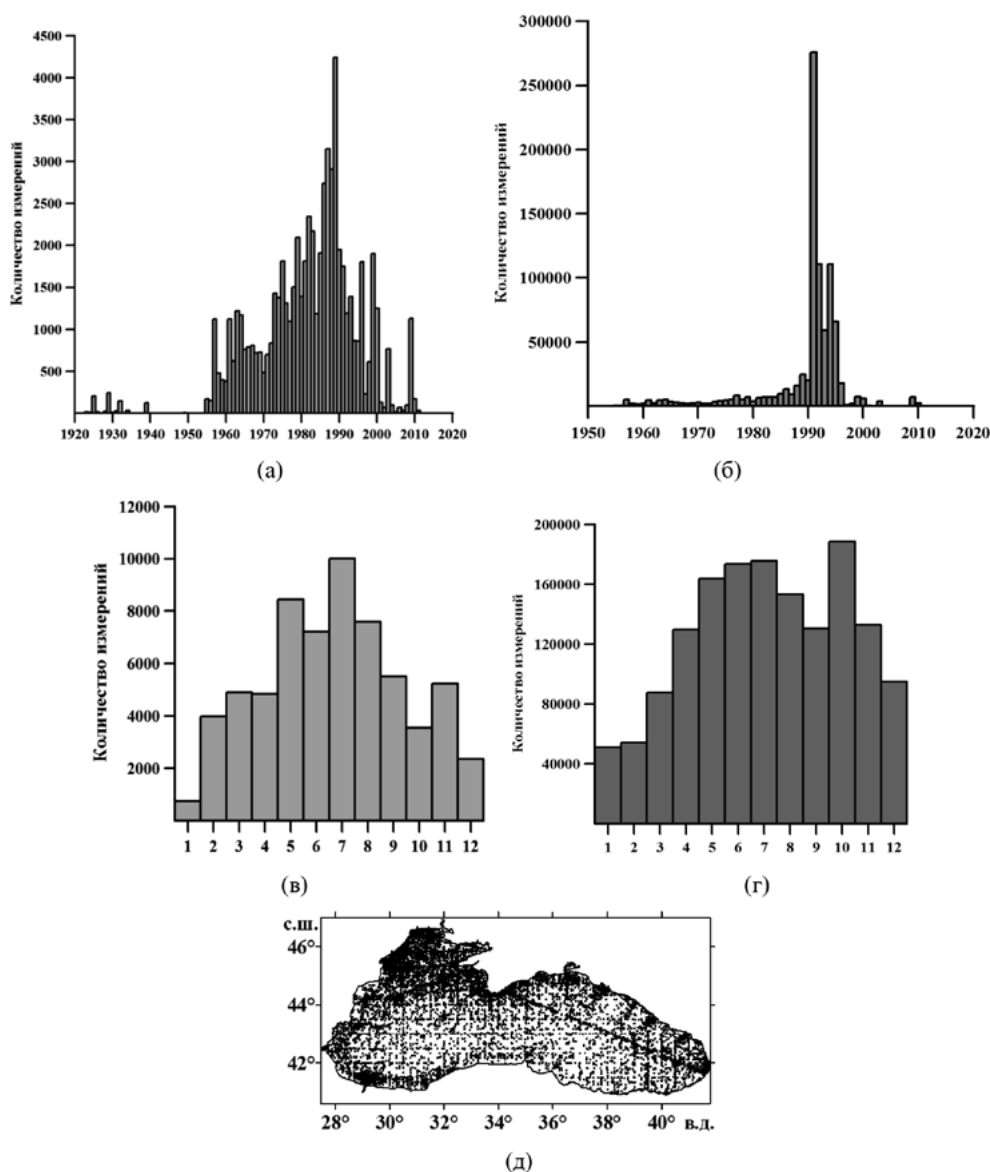


Рис. 1. Пространственное распределение гидролого-гидрохимических судовых измерений, выполненных в Черном море, из банка данных ИПТС: ежегодное количество измерений кислорода (а) и температуры (б), общее количество измерений кислорода (в) и температуры (г) по месяцам; пространственное расположение судовых данных по кислороду в слое от 0 до 10 м (д).

ИСХОДНЫЕ ДАННЫЕ И МЕТОДИКА ИССЛЕДОВАНИЯ

В настоящей работе проводится анализ долгопериодной изменчивости растворенного кислорода и температуры воды в слое от поверхности до 10 м на основании архива данных океанографического банка Института природно-технических систем (ИПТС) за период с 1923 по 2013 гг [18]. По данным авторов работы [18] количество станций, на которых проводились наблюдения за кислородом в Черном море за исследуемый период, составляет 36 393, по температуре – 113 143. Однако распре-

деление данных по пространству и во времени крайне неравномерно (рис. 1). Исследования гидрохимии вод Черного моря начались с 1923 года, но они не были систематическими и ограничивались прибрежной полосой вдоль берегов СССР от Одессы до Батуми шириной до 50 миль (в редких случаях – до 70 миль). Эпизодически проводились сезонные разрезы, пересекающие самую узкую часть Черного моря по линии м. Сарыч (Южный берег Крыма) – г. Инеболу (анатолийский берег Турции), а также разрезы Инеболу–Констанца, Констанца–Севастополь [3]. Как видно из рис. 1, регулярные наблюдения за кислородом и температурой

в Черном море начались с середины 1950-х годов. Наибольшее число измерений выполнено с начала 1980-х и до начала 1990-х годов. С середины 1990-х годов количество регулярных рейсов в целом резко уменьшилось. По месяцам количество измерений кислорода и температуры распределено также неравномерно. Наименьшее число наблюдений выполнено в январе, а наибольшее — в июле (по кислороду) и в октябре (по температуре). Причем наибольшее число наблюдений приходится на северо-западную часть Черного моря.

Контроль качества используемых данных осуществлялся в два этапа. Вначале проверялись географические координаты станций. Данные, не попавшие на акваторию Черного моря (в том числе на сушу), удалялись. Затем для каждого параметра рассчитывались среднеквадратические отклонения по всем данным (σ) и удалялись значения, которые не попадали в интервал $\pm 3\sigma$.

Для построения полей кислорода и температуры был использован метод оптимальной интерполяции [5]. Поля восстанавливались в узлах регулярной сетки с шагом 5° по широте и $8.57'$ по долготе (5×5 миль). Подробности вычислительной процедуры приведены в работе [21].

Так как основная задача исследования заключалась в восстановлении крупномасштабной структуры полей, после применения оптимальной интерполяции проводилось дополнительное их сглаживание. Для этого использовался пространственный фильтр следующего вида:

$$x_{i,j} = \frac{\sum_{k,m=-n+1}^{n-1} x_{i+k,j+m} f(k,m)}{\sum_{k,m=-n+1}^{n-1} f(k,m)},$$

где $x_{i,j}$ — значение кислорода или температуры в узле сетки i,j ; $f(k,m) = 1 - \frac{k^2 + m^2}{n^2}$, $f(k,m) \geq 0$ — пространственный фильтр, n — количество точек сетки, попадающих в область сглаживания.

Как известно из литературных источников [4, 6, 12, 15, 26], на формирование кислородного режима влияют гидрометеорологические условия, характер распределения температуры и солености, интенсивность фотосинтеза, а также речной сток в северо-западную часть Черного моря и воды Мраморного моря, поступающие через пролив Босфор на юго-западе.

Северо-западный и юго-восточный районы находятся в разных климатических условиях. Перечисленные факторы приводят к неоднородному распределению кислорода по акватории Черного моря. Рисунки 2а и 2б, в целом подтверждающие данные Атласа [20], наглядно иллюстрируют это. Поскольку цель работы заключалась в установлении связи долгопериодной изменчивости растворенного кислорода с региональными климатическими изменениями, характеризующимися выраженной неоднородностью, мы рассматриваем эту изменчивость для нескольких субрегионов в отдельности. В настоящей работе будет проанализирована изменчивость кислорода и температуры верхнего слоя в северо-западной и глубоководной частях Черного моря, на акватории, ограниченной изобатой 1000 м. Причем будет анализироваться изменчивость растворенного кислорода и температуры в слое 0–10 м, который хорошо перемешан на протяжении большей части года (рис. 3). Отметим, что типичная пространственная неоднородность в среднесезонном поле концентрации растворенного кислорода составляет для открытой части моря $10 \mu\text{моль/л}$ (рис. 2), что принципиально не влияет на выделенные междесятилетние вариации содержания кислорода, величина которых (как показано ниже) существенно больше.

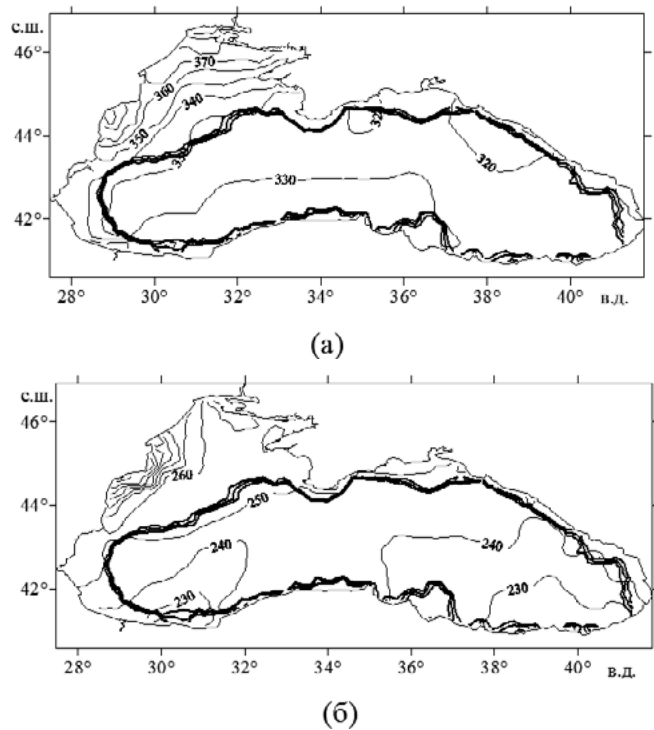


Рис. 2. Распределение содержания растворенного кислорода на поверхности ($\mu\text{моль/л}$) в январе–марте, период осреднения с 1928 по 2004 г. (а) и в июле–сентябре, период осреднения с 1923 по 2013 г. (б) (жирные изолинии — изобаты 1000, 1100 и 1200 м).

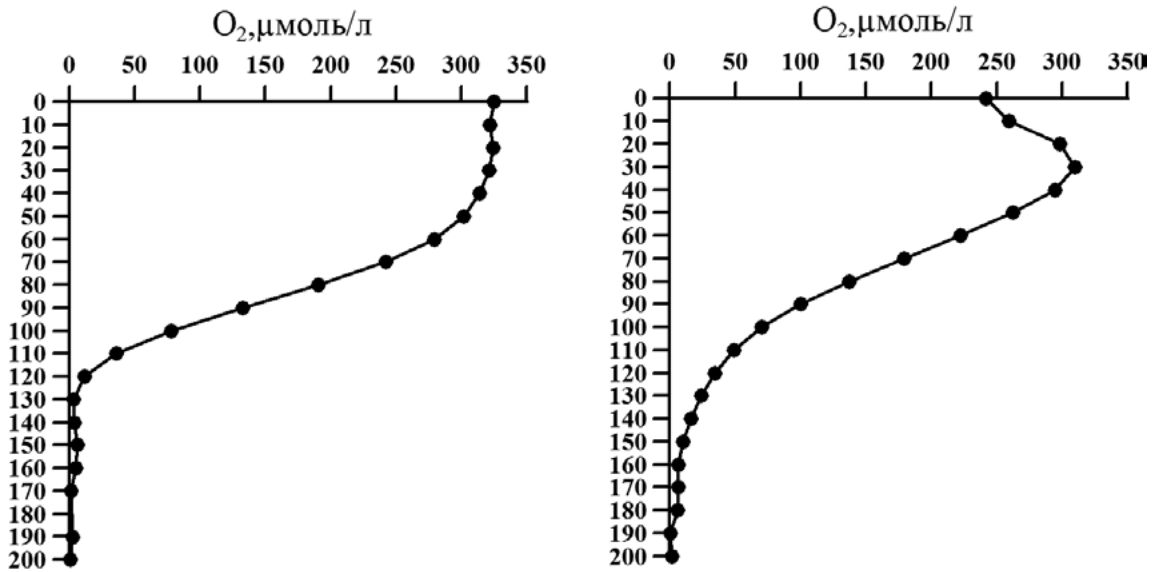


Рис. 3. Осредненный по всем данным вертикальный профиль содержания растворенного кислорода в глубоководной части Черного моря: для января–марта (а) и июля–сентября (б).

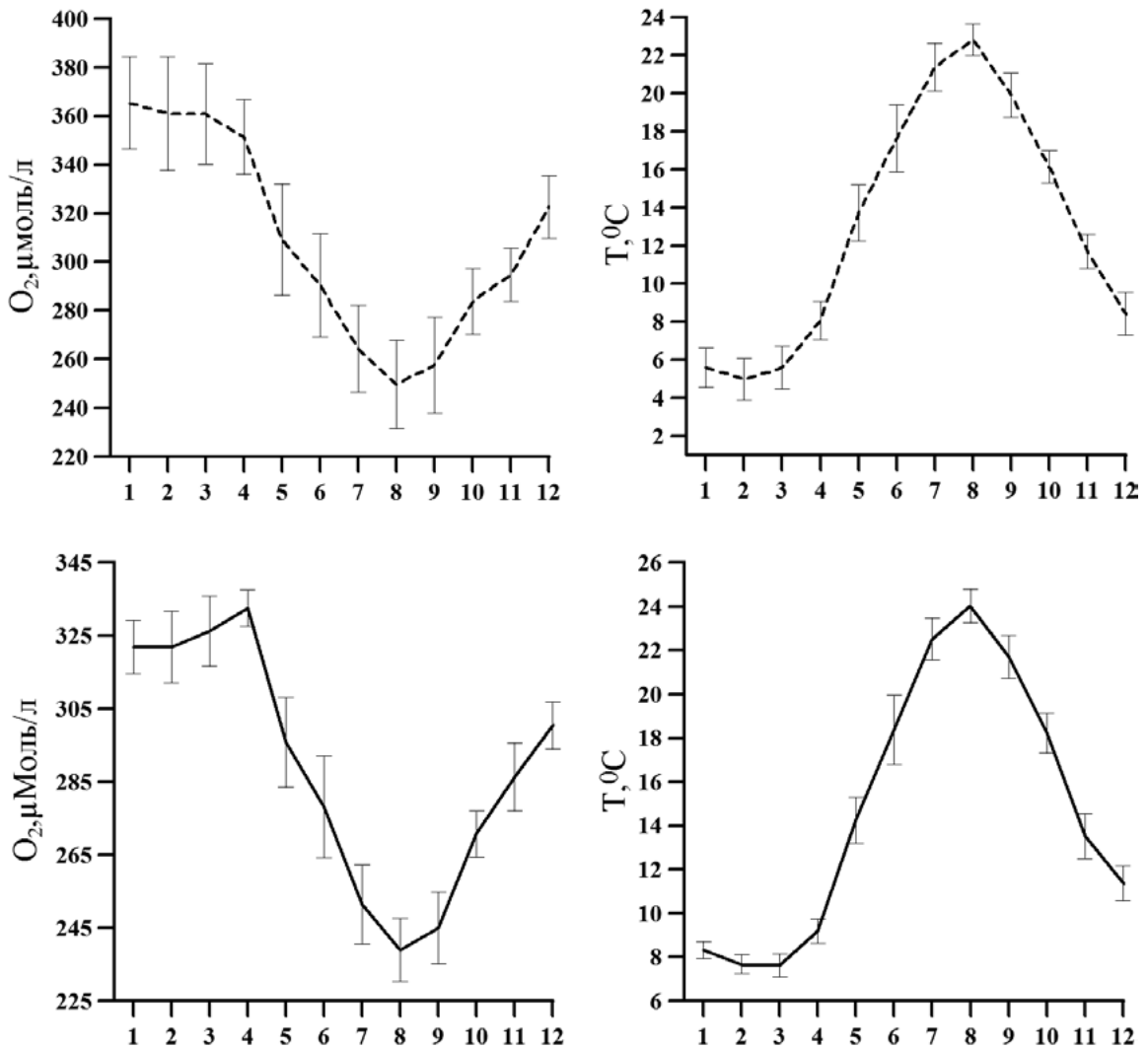


Рис. 4. Сезонный ход среднемесячных значений кислорода (а) и температуры (б) в слое 0–10 м в глубоководной (показано сплошными кривыми) и северо-западной (показано пунктиром) частях Черного моря, осредненный за период с 1923 по 2013 г. (вертикальные отрезки $\pm 0.5\sigma$).

РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ АНАЛИЗ

Сезонная изменчивость. Глубоководная часть моря. На внутригодовом масштабе концентрация кислорода в верхнем слое глубоководной части Черного моря испытывает следующие изменения (рис. 4 а). В период с января по апрель наблюдается повышенное содержание кислорода (среднее значение в этот период — 326 $\mu\text{моль/л}$). Понижение содержания кислорода (более чем на 90 $\mu\text{моль/л}$) происходит с апреля по август. С августа по апрель происходит рост концентрации растворенного кислорода. Максимум содержания кислорода отмечается в апреле (333 $\mu\text{моль/л}$), минимум — в августе (239 $\mu\text{моль/л}$). Сезонный ход концентрации растворенного кислорода в пределах статистической погрешности хорошо согласуется с сезонным ходом температуры поверхностных вод и противофазен ему. В январе — марте наблюдаются самые низкие температуры (8°C и менее), а с апреля начинается постепенный рост температуры, которая достигает максимума (около 24°C) в августе (рис. 4 б). Коэффициент корреляции сезонного хода кислорода и температуры составляет -0.98.

Описанная внутригодовая изменчивость в целом подтверждает данные Атласа [20]. Вместе с тем, можно констатировать, что в отдельные периоды сезонный цикл содержания растворенного кислорода и температуры несколько модифицируется. Так, по осредненным за 1961—1965 гг. данным максимальное содержание кислорода наблюдалось в марте, а в 1983—1987 гг. — в феврале. Главная причина изменения концентрации растворенного кислорода в зимний период — уменьшение температуры. В 1961—1987 гг. температура в зимние месяцы понизилась приблизительно на 1.5°C, а в августе — на 0.5°C, что явилось следствием междесятилетней изменчивости гидролого-гидрохимического режима, анализируемой ниже.

Северо-западная часть моря. Сезонная изменчивость концентрации растворенного кислорода в северо-западной части Черного моря аналогична внутригодовым изменениям, характерным для глубоководной части моря. Вместе с тем, абсолютные значения концентрации растворенного кислорода и амплитуда сезонных вариаций в северо-западной части Черного моря выше, чем в открытой части моря (рис. 4 а). С января по апрель наблюдается повышенное содержание кислорода (среднее значение за период с января по апрель составляет 359.6 $\mu\text{моль/л}$). С апреля по август происходит резкое понижение содержания кислорода (бо-

лее чем на 100 $\mu\text{моль/л}$). С августа по декабрь происходит рост содержания кислорода (более чем на 72 $\mu\text{моль/л}$). Максимум содержания кислорода приходится на январь (365 $\mu\text{моль/л}$), а минимум — на август (250 $\mu\text{моль/л}$). Аналогично глубоководной части, в северо-западной части сезонный ход концентрации растворенного кислорода согласуется с сезонным ходом температуры. С января по март наблюдаются самые низкие значения температуры. С февраля-марта по август происходит резкое повышение температуры (более чем на 17°C). С августа по февраль наблюдается понижение температуры. Минимум температуры (5°C) достигается в феврале, а максимум (почти 23°C) — в августе (рис. 4 б). Коэффициент корреляции сезонного хода кислорода и температуры составляет -0.96. В целом эти результаты не противоречат опубликованным данным. Вместе с тем описанный сезонный цикл может варьировать от одного десятилетия к другому вследствие наличия долгопериодных климатических изменений, по разному проявляющихся в различные сезоны. Причем характер трансформации сезонного цикла может быть неодинаков на северо-западном шельфе и в открытой части Черного моря.

Междесятилетняя изменчивость. В междесятилетней изменчивости растворенного в верхнем слое глубоководной и северо-западной частей Черного моря кислорода и температуры воды наблюдается квазипериодическая компонента с характерным временным масштабом в несколько десятков лет

Глубоководная часть. В зимний период с 1955 по 1969 г. и начиная с 1995 г. содержание растворенного кислорода уменьшалось, в то время как температура в это время росла. С 1970 по 1994 г. происходило увеличение среднедекадного содержания растворенного кислорода (более чем на 25 $\mu\text{моль/л}$), а температура воды в эти годы уменьшилась приблизительно на 1.5°C. Уменьшение среднедекадного растворенного кислорода с 1995 по 2004 г. составило более 15 $\mu\text{моль/л}$ (рис. 5). Коэффициент корреляции междесятилетней изменчивости кислорода и температуры в зимний период составляет -0.9.

В июле — сентябре на междесятилетнем масштабе рост концентрации растворенного кислорода приходится на 1955—1999 гг. (на 28 $\mu\text{моль/л}$), а падение — на 1999—2004 гг. (примерно на 33 $\mu\text{моль/л}$) (рис. 6). С 1955 по 1984 г. происходило падение температуры (более чем на 1°C). С 1984 по 1994 г. температура росла, а с 1994 по 2004 г. — уменьшалась.

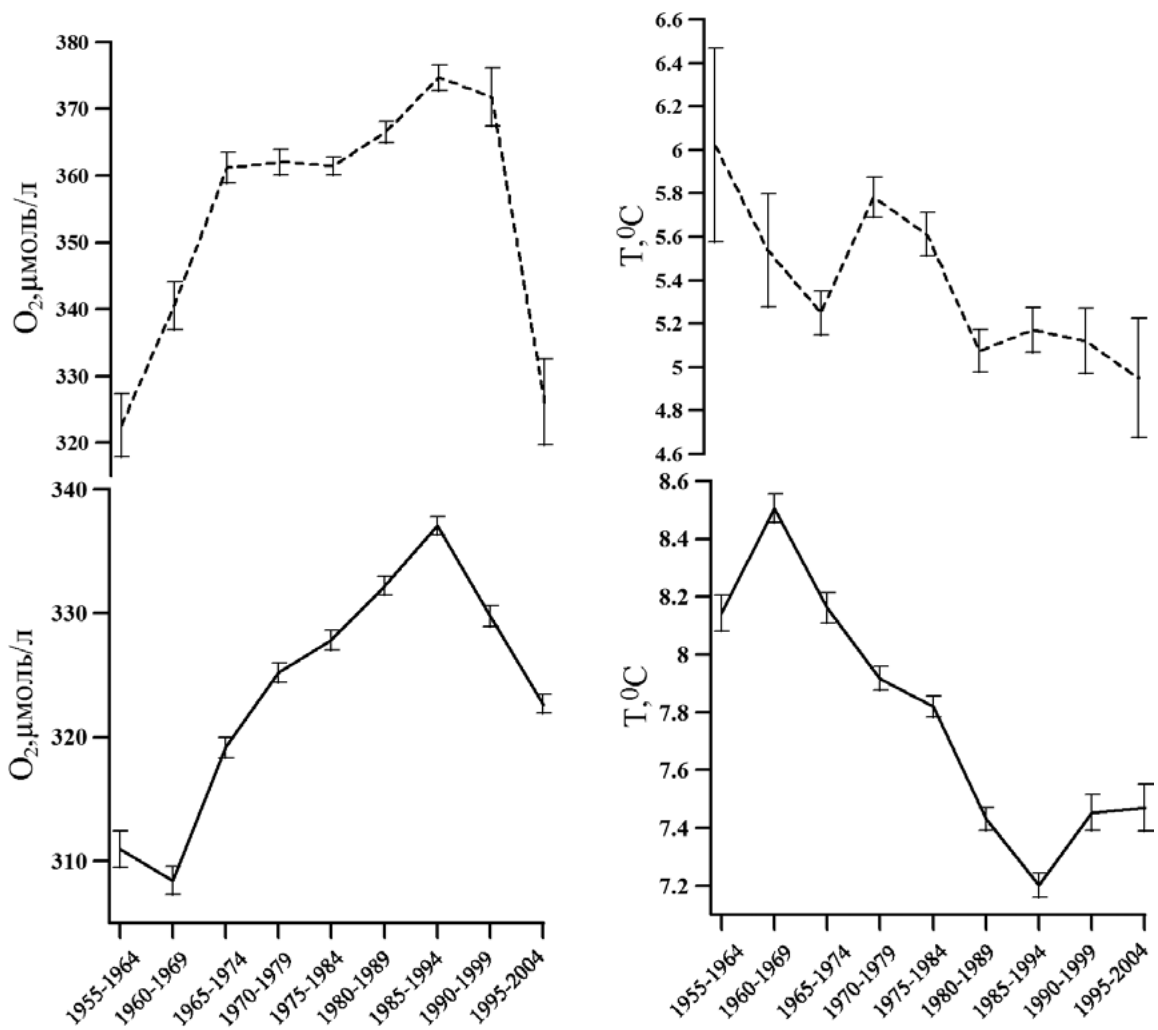


Рис. 5. Междесятилетия изменчивость среднедекадных значений кислорода (а) и температуры (б) на поверхности в глубоководной (показано сплошными кривыми) и северо-западной (показано пунктиром) частях Черного моря для января-марта (вертикальные отрезки — 95% доверит. интервал).

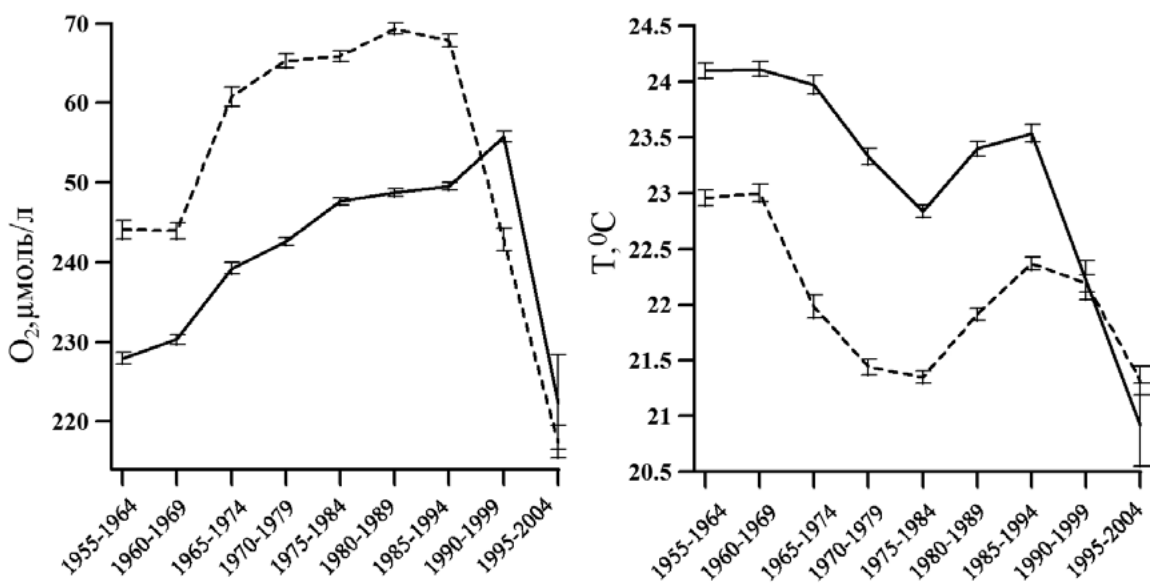


Рис. 6. Междесятилетия изменчивость среднедекадных значений кислорода (а) и температуры (б) на поверхности в глубоководной (показано сплошными кривыми) и северо-западной (показано пунктиром) частях Черного моря для июля-сентября (вертикальные отрезки — 95% доверит. интервал).

Северо-западная часть. С января по март в десятилетней изменчивости растворенного кислорода и температуры верхнего слоя северо-западной части Черного моря (рис. 5) наблюдается квазипериодическая изменчивость, так же как и в глубоководной части. В период с 1955 по 1994 г. происходит увеличение растворенного кислорода (примерно на 52 $\mu\text{моль/л}$), а температура воды с 1955 по 1974 г. понижается (приблизительно на 0.7°C), а с 1974 по 1979 г. — увеличивается на 0.5°C. С 1985 по 2004 г. происходит понижение растворенного кислорода (примерно на 48 $\mu\text{моль/л}$).

Отметим, что летом десятилетия изменчивость концентрации растворенного кислорода в значительно меньшей степени согласуется с изменчивостью температуры, чем зимой. Это справедливо и для открытой части Черного моря, и для северо-западного шельфа. Частично это связано с тем обстоятельством, что в летний период происходит интенсивное развитие фотосинтетических процессов, сильно влияющих на кислородный режим верхнего слоя моря. Однако особенно это выражено для северо-западной части Черного моря, где на изменчивость поля кислорода сильно влияют вариации стока рек, характеризующихся

кислородным режимом, отличным от режима вод морской акватории [2, 16, 19, 25]. Вместе с тем обращает на себя внимание одно согласованное изменение во временном ходе температуры и растворенного кислорода на анализируемом временном масштабе. До 1990-х гг. температура верхнего слоя вод в северо-западной части моря была существенно ниже, а концентрация растворенного кислорода выше, чем во внутренней части бассейна, причем и зимой, и летом (рис. 5, 6). В 1990-е и начале 2000-х годов в летний период среднедекадная температура приповерхностного слоя на северо-западном шельфе превысила температуру вод этого слоя в открытой части акватории моря. При этом концентрация растворенного кислорода в водах северо-западного шельфа стала меньше, чем в приповерхностных водах внутренней части акватории (рис. 6). В зимний же период на протяжении всего анализируемого временного интервала температура верхнего слоя вод в северо-западной части моря была существенно ниже, а концентрация растворенного кислорода выше, чем во внутренней части бассейна. Это неизбежно должно приводить к изменению параметров сезонного цикла.

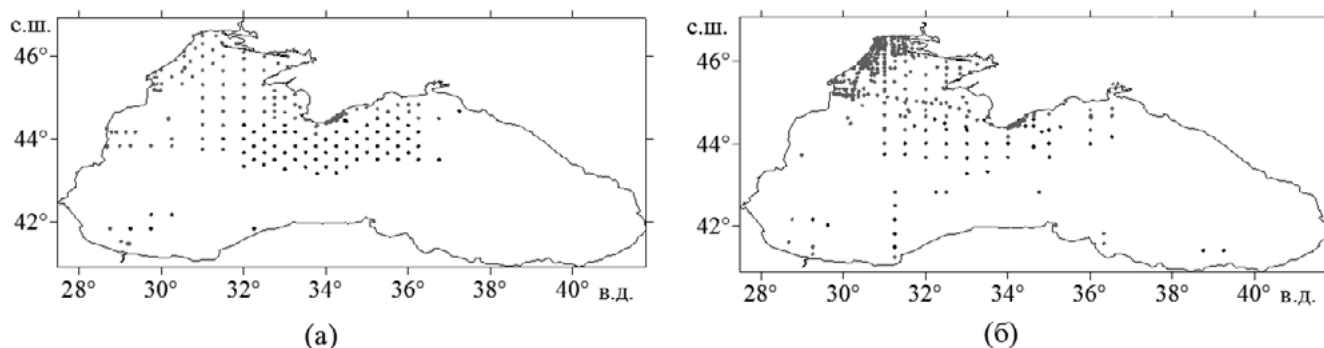


Рис. 7. Пространственное распределение измерений концентраций растворенного кислорода (банк данных ИПТС) в Черном море за период с января по март (а) и с июля по сентябрь (б), выполненных в глубоководной (темные точки) и северо-западной (светлые точки) частях Черного моря за период 1995–2004 гг.

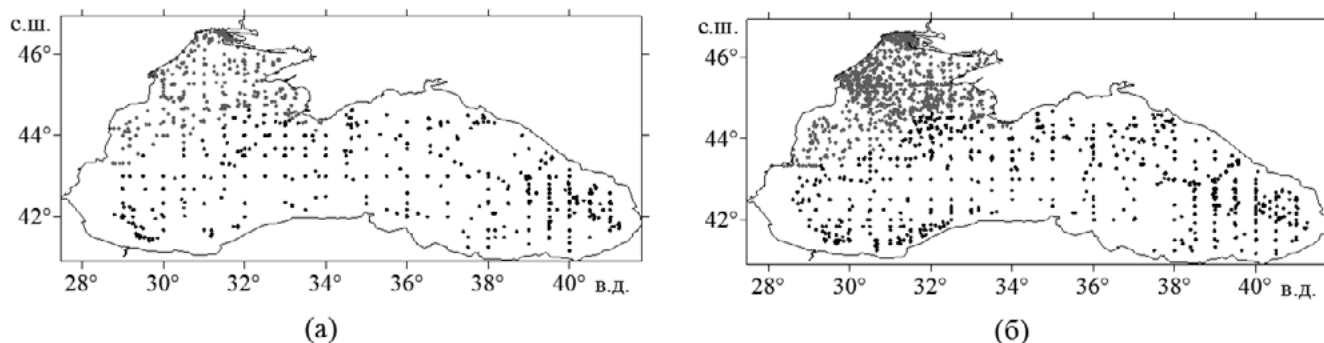


Рис. 8. Пространственное распределение измерений концентраций растворенного кислорода (банк данных ИПТС) в Черном море за период с января по март (а) и с июля по сентябрь (б), выполненных в глубоководной (темные точки) и северо-западной (светлые точки) частях Черного моря за период 1980–1989 гг.

Влияние выборочной изменчивости (или, другими словами, погрешности, обусловленной пространственно-временной неоднородностью используемого массива данных наблюдений) на полученные результаты не является критическим. Уменьшение числа наблюдений в 1990-е годы (рис. 7 и 8), конечно, влияет на точность оценки средних по акватории значений концентрации растворенного кислорода. Принимая во внимание пространственную неоднородность концентрации кислорода в водах Черного моря и то обстоятельство, что наблюдения в 1990-е и начале 2000-х гг. выполнялись в основном в области с более низким содержанием растворенного кислорода (рис. 2 и 7), это приводит к частичной недооценке средних по акватории моря значений растворенного кислорода для этого периода. Вместе с тем, сравнение рис. 2, 7 и 8 ясно показывает, что это занижение не должно превышать величину от нескольких единиц до ~5–6 $\mu\text{моль/л}$. Для более точной оценки выборочной изменчивости было проведено сравнение осредненных величин концентрации растворенного кислорода по наиболее обеспеченному наблюдениями десятилетию и наименее обеспеченному в предположении о неизменности самого поля. Причем, в качестве такого поля использовалось климатическое распределение растворенного кислорода для соответствующего сезона, построенное по всем доступным данным. Оказалось, что выборочная изменчивость концентрации растворенного в верхнем слое моря кислорода по амплитуде примерно на порядок меньше, чем выявленная междесятилетняя изменчивость этой величины и для зимы, и для лета (до 3 $\mu\text{моль/л}$ для зимы и до 5 $\mu\text{моль/л}$ для лета). Другим подтверждением достоверности выделенного сигнала является тот факт, что полученные результаты в целом согласуются с опубликованными оценками [23, 24], которые основаны на результатах обработки массива экспериментальных данных Морского гидрофизического института [1]. Этот массив, хотя и менее обеспечен данными наблюдений за концентрацией растворенного кислорода, чем банк данных ИПТС, тем не менее, тоже позволяет выделить междесятилетние колебания величины концентрации растворенного кислорода, близкие к описанным в настоящей работе. Таким образом, этот сигнал является статистически достоверным.

Необходимо отметить, что при рассмотрении временного отрезка, меньшего чем период выделенного колебания, в изменчивости величи-

ны растворенного кислорода наблюдается значимый линейный тренд, знак которого зависит от того, на какую фазу квазипериодического колебания приходится этот отрезок. Так, например, при анализе временного хода величины растворенного кислорода в период с начала 1960-х до середины 1990-х гг. четко выделяется значимый положительный линейный тренд, а позже (с середины 1990-х гг.) – отрицательный. В нескольких работах отмечалось наличие соответствующих тенденций (см., например, [4, 22]). Однако, на самом деле, выделенные таким образом линейные тренды характеризуют лишь период и амплитуду квазипериодического колебания, обусловленного региональными изменениями климата, связанными, например, с Атлантической мультideкадной осцилляцией [36].

ВЫВОДЫ

Анализ сезонной и долгопериодной изменчивости концентрации растворенного в верхнем слое вод Черного моря кислорода, основанный на данных наблюдений, полученных на >36 000 станциях в северо-западной и глубоководной частях моря, показал следующее. Осредненный более чем за 60 лет сезонный ход кислорода не противоречит существующим представлениям. Он характеризуется максимумом в зимний период, минимумом – в летний и согласуется с сезонным ходом температуры. Коэффициент корреляции между сезонными вариациями температуры и растворенного кислорода в верхнем слое достигает –0.98. Амплитуда сезонных вариаций концентрации растворенного кислорода превышает 50 $\mu\text{моль/л}$. Вместе с тем в отдельные периоды продолжительностью 20–30 лет описанный сезонный цикл модифицируется. Максимум содержания растворенного кислорода может наблюдаться с февраля по апрель. На междесятилетнем масштабе и в зимний, и в летний сезон, концентрация растворенного кислорода характеризуется выраженной квазипериодической изменчивостью с типичным временным масштабом в несколько десятков лет и амплитудой примерно вдвое меньшей амплитуды внутригодового хода. В зимний период эта изменчивость в основном связана с региональными изменениями температуры морской воды. Летом (особенно, на северо-западном шельфе) важны и другие факторы (вариации стока рек, температура речных вод, фотосинтез и др.). Вследствие этого в 1990-е и начале 2000-х гг. в летний период температура поверхностного слоя

вод северо-западного шельфа превысила температуру поверхности в открытой части моря и одновременно уменьшилась концентрация растворенного кислорода.

Благодарности. Авторы благодарят анонимного рецензента за критику первого варианта работы и полезные замечания, учет которых позволил повысить статистическую значимость результатов и улучшить содержание статьи.

Источник финансирования. Исследование выполнено при финансовой поддержке РФФИ (грант № 14-45-01033).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Андриющенко Е.Г., Галковская Л.К., Годин Е.А. и др. Банк океанографических данных МГИ НАН Украины: информационные ресурсы и доступ к данным // Севастополь: НПЦ «ЭКОСИ-Гидрофизика», 2010. 59 с.
2. Белевич Р.Р., Орлова И.Г. Особенности межгодовой изменчивости гидролого-гидрохимических характеристик вод на северо-западном шельфе Черного моря в последние десятилетия (60-90-е гг.) // Морск. гидрофиз. журн. 1996. Т. 2. С. 72-73.
3. Виноградов К.А. Очерки по истории отечественных гидробиологических исследований на Черном море. Киев: Изд. АН УССР, 1958. 155 с.
4. Богданова А.К. К вопросу о вертикальном распределении кислорода в Черном море // Тр. Севастопольской биологической станции. 1959. Т. 9. С. 297-315.
5. Гандин Л.С. Объективный анализ метеорологических полей. Л.: Гидрометеоиздат, 1963. 287 с.
6. Гидрометеорология и гидрохимия морей СССР. Т. 4. Черное море. Вып. 1, Гидро-метеорологические условия / Под ред. Симонова А. И., Альтмана Э. И. Л.: Гидро-метеоздат, 1991. 430 с.
7. Добржанская М.А. Результаты гидрохимических наблюдений в августе 1951 г. и основные выводы по ним // Рукопись Севастоп. биол. ст., 1952.
8. Добржанская М.А. Гидрохимический режим Черного моря в апреле 1952 г. // Рукопись Севастоп. биол. ст. 1954. 378 с.
9. Добржанская М.А. Характер вертикального распределения кислорода в зависимости от времени года в верхней 100-метровой толще центральной части Черного моря // Тр. Севастопольской биологической станции. 1959. Т.1. С. 284-296.
10. Добржанская М.А. Основные черты гидрохимического режима Черного моря // Тр. Севастопольской биологической станции. 1960. Т. 13. С. 325-378.
11. Добржанская М.А. Закономерности пространственного распределения кислорода на различных глубинах Черного моря // Океанографические исследования Черного моря. Киев: Наукова думка, 1967. С. 154-169.
12. Добровольский А.Д., Залогин Б.С. Моря СССР. М.: Изд-во МГУ, 1982. 192 с.
13. Еремеев В.Н., Коновалов С.К., Романов А.С. Особенности распределения кислорода и сероводорода в водах Черного моря в зимне-весенний период // Морск. гидрофиз. журн. 1997. № 4. С. 32-46.
14. Еремеев В.Н., Латун В.С., Совга Е.Е. Влияние антропогенных загрязнителей и путей их переноса на экологическую обстановку в северо-западном районе Черного моря // Морск. гидрофиз. журн. 2001. Т 5. С.41-55.
15. Жоров В.А., Богуславский С.Г., Иванов Р.И. и др. Распределение кислорода и сероводорода в летний период // Комплексные исследования Черного моря. 1979. С. 122-133.
16. Зайцев Ю.П. Экологическое состояние шельфовой зоны Черного моря у побережья Украины (обзор) // Гидробиологический журн. 1992. Т. 28. №. 4. С. 3-18.
17. Леонов А.К. Региональная океанография. Ч. 1. Л.: Гидрометеоиздат, 1960. 754 с.
18. Мельников В.В., Полонский А.Б., Котолупова А.А. и др. GIS Института природно-технических систем // Системы контроля окружающей среды. 2016. Вып. 4 (24). С. 42-49.
19. Овчинников И.М., Осадчий А.С. Вековая изменчивость зимних климатических условий, определяющих особенности гидрологического режима Черного моря //Изменчивость экосистемы Черного моря: естественные и антропогенные факторы. М.: Наука, 1991. С. 85-89.
20. Океанографический атлас Черного и Азовского морей. Киев: ДУ «Держгидрографія», 2009. 356 с.
21. Полонский А.Б., Шокурова И.Г. Статистическая структура крупномасштабных полей температуры и солености в Черном море // Морск. гидрофиз. журн. 2008. № 1. С. 51-65.
22. Полонский А.Б., Шокурова И.Г. Долгопериодная изменчивость температуры пикноклина в Черном море в XX и начале XXI столетия // Докл. НАН Украины. 2011. № 9. С. 103-110.
23. Полонский А.Б., Огородова А.А. Временная изменчивость содержания кислорода в верхнем слое глубоководной части Черного моря // Системы контроля окружающей среды. 2014. Вып. 20. С. 149-152.

24. *Полонский А.Б., Свищев С.В.* Сезонные междесятилетние изменения концентрации кислорода в поверхностных водных массах Черного моря // Системы контроля окружающей среды, 2014. Вып. 20. С. 153-156.
25. *Селин П.Ю., Михайлов Н.Н., Волков Н.В.* Изменчивость гидрохимического режима вод северо-западного шельфа Черного моря // Сб. научн. тр.: Экология прибрежной зоны Черного моря. М.: ВНИРО, 1992. С. 59-100.
26. *Харвей Х.В.* Биохимия и физика моря. Л.: Изд-во АН СССР, 1933. 79 с.
27. *Шульгина Е.Ф.* Гидрохимическая характеристика северо-западного района Черного моря по наблюдениям 1956-1958 гг. // Тр. ГОИН. 1961, № 59. С. 29-57.
28. *Шульгина Е.Ф.* Распределение кислорода в Черном море // Комплексные гидрофизические и гидрохимические исследования Черного моря. Севастополь: МГИ АН УССР, 1980. С. 97-111.
29. *Чигирин Н.И.* Распределение кислорода в Черном море // Труды Второго Всесоюзного гидрологического съезда. 1930. Ч.3. С. 341-343.
30. *Чигирин Н.И.* Химия Черного моря // Рукопись Севастоп. биол. Станции АН СССР. 1935.
31. *Bastürk O., Saydam C., Salihoglu I. et al.* Vertical variations in the principle chemical properties of the Black Sea in the autumn of 1991 // Marine Chemistry. 1994. V 45. № 1. P. 149-165.
32. *Konovalov S.K., Murray J.W.* Variations in the chemistry of the Black sea on a time scale of decades (1960– 1995) // J. of Marine Systems. 2001. V. 31. № 1-3. P. 217-243.
33. *Konovalov S. K., Murray J.W., Luther G. W. et al.* Oxygen fluxes, redox processes and the Suboxic zone in the Black Sea // Oceanography of the Eastern Mediterranean and Black Sea / Ed. Yilmaz A. Proceeding of the «Second International Conference on Oceanography of the Eastern Mediterranean and Black Sea: Similarities and Differences of Two Interconnected Basins», TUBITAK Publishers. Ankara, Turkey, 2003. P. 566-577.
34. *Murray J.W., Jannash H.W., Honjo S. et al.* Unexpected changes in the oxic/anoxic interface in the Black Sea // Nature. 1989. V. 337. P. 411-413.
35. *Oguz, T.* The role of physical processes controlling the Oxycline and Suboxic Layer structures in the Black Sea. Global Biogeochem. Cycles, 2002, 16(2), doi: 10.1029/2001GB001465.
36. *Polonsky A.B.* Oceans, global warming hiatus and regional climate variability (Global and regional climate change, atmospheric and marine variability in the Black Sea region) // Lambert Academic Publishing, Saarbrucken, Germany, 2015. 192 p.
37. *Saydam C., Tugrul S., Basturk O., Oguz T.* Identification of the oxic/anoxic interface by isopycnal surfaces in the Black Sea // Deep - Sea Res. 1993. V 40. No 7. P. 1405-1412.

Long-Term Variability of Dissolved Oxygen and Temperature of the Upper Layer of the Black Sea

© 2019 A. B. Polonsky, A. A. Kotolupova

*Institute of Natural and Technical Systems, Sevastopol, Russia
e-mail: apolonsky5@mail.ru, ogorodovaa.a@mail.ru*

Received March 23, 2015

After revision June 3, 2016

The article provides an analysis of intra- and inter-annual variability of dissolved oxygen and temperature in the upper layer of the deep-water and north-western parts of the Black Sea in the period from 1923 to 2013. The analysis is carried using the archived data from the oceanographic database of Institute of natural and technical systems. Seasonal variability of dissolved oxygen concentration and temperature is out-of-phase. In average, dissolved oxygen concentration is at a maximum at the N-W shelf in winter and is at a minimum in the open Sea in summer. The amplitude of the seasonal variations is about 50 $\mu\text{mol/l}$. In general, this is consistent with the published results on the seasonal variation in temperature. However, in some periods, lasting about 20 to 30 years, seasonal variation varies. It is due to quasi-periodical interdecadal variability of dissolved oxygen concentration which differs from one season to another and in various subregions.

Keywords: Interdecadal variability of dissolved oxygen, upper mixed layer, north-western shelf and deep-sea basin