

**О ПРИЧИНАХ ДОЛГОВРЕМЕННЫХ ТЕНДЕНЦИЙ В ИЗМЕНЧИВОСТИ
КОНЦЕНТРАЦИИ РАСТВОРЕННОГО КИСЛОРОДА И СОЛЕННОСТИ
В ОБЛАСТИ ХОЛОДНОГО ПРОМЕЖУТОЧНОГО СЛОЯ ЧЕРНОГО МОРЯ****А.А. Валле, А.Б. Полонский**

Институт природно-технических систем,
РФ, г. Севастополь, ул. Ленина, 28
E-mail: ogorodova.a@mail.ru

По архивным данным за период с 1923 по 2020 гг. анализируется пространственно-временная изменчивость солёности и концентрации растворенного кислорода в Черном море на горизонтах 50 и 75 м. Показано, что долговременная тенденция снижения концентрации растворенного кислорода и одновременное увеличение солёности в области холодного промежуточного слоя в центральных частях западного и восточного циклонических круговоротов сопровождается увеличением насыщения кислородом вод на свале глубин в районе северо-западной части моря и уменьшением солёности (вблизи горизонта 75 м). Это свидетельствует о важной роли интенсификации вертикальных движений в формировании пространственно-временной изменчивости растворенного кислорода в водах Черного моря на десятилетних масштабах.

Ключевые слова: концентрация растворенного кислорода, солёность, долгопериодная изменчивость, западный и восточный циклонические круговороты, свал глубин.

Поступила в редакцию: 15.05.2023. После доработки: 09.06.2023.

Введение. Черное море – одно из наиболее изученных морей Мирового океана. С середины 20-го века в Черном море проводились и до сих пор регулярно проводятся многочисленные рейсы научно-исследовательских судов. В последние 13 лет осуществляется мониторинг вертикальной структуры гидролого-гидрохимических характеристик с помощью буев-профилографов ARGO. По результатам выполненных исследований опубликованы сотни научных статей и монографий.

Хорошо известно, что Черное море является уникальным полузамкнутым бассейном с характерной термохалинной структурой вод, которые слабо вентилируются из-за очень устойчивой вертикальной стратификации. Уникальность моря по сравнению с большинством районов Мирового океана заключается в расслоении моря на тонкий опресненный верхний слой и залегающий под ним более солёный слой, что и обуславливает

сильную плотностную стратификацию и ограничивает поступление кислорода в область глубин, расположенных под холодным промежуточным слоем (ХПС).

Устойчивая вертикальная стратификация вод Черного моря является результатом двух внешних факторов. Первый из них – это приток высокосолёных мраморноморских вод через пролив Босфор, которые опускаются до дна из-за их высокой плотности. Второй фактор – это распреснение поверхностных вод речным стоком и (в меньшей степени) осадками. Большая часть речных вод поступает в глубоководную часть Черного моря с северо-западного шельфа. Формирующаяся резкая вертикальная плотностная стратификация препятствует конвективному перемешиванию и поступлению концентрации растворенного кислорода в область промежуточных и глубинных вод, что и вызывает аноксические условия основной толщи вод моря. Начало аноксии наблюдается на глу-

бинах порядка 100 м (там, где $\sigma_t = 16,15-16,20$) и распространяется до дна (т.е. до глубин ~ 2200 м) [1–7]. В условиях современного потепления верхнего слоя вод Черного моря стратификация еще более обостряется из-за роста вертикальных градиентов температуры. Это приводит к дальнейшему ослаблению вертикального перемешивания [8].

В большинстве опубликованных работ для анализа долгопериодных тенденций гидролого-гидрохимических характеристик Черного моря использовались данные наблюдений, полученные в разных частях моря и в разные периоды, а также обладающие отличным друг от друга пространственно-временным разрешением. Это не позволяет получить надежное описание изменчивости концентрации растворенного кислорода и солености на временных масштабах, превышающих несколько десятилетий [9–13].

В некоторых работах именно увеличением вертикальных градиентов плотности в подповерхностном слое объяснялось резкое понижение концентрации растворенного кислорода в верхней части промежуточных вод, отмечавшиеся в период с середины 20-го столетия до 2015 г. [8]. Вместе с тем в ряде работ подчеркивается важность изменений интенсивности вертикальных движений в формировании долговременных тенденций в вертикальной структуре вод моря [14].

В последние годы для анализа долговременных тенденций изменения гидрологической структуры вод Черного моря используются результаты численных расчетов и данные ре-анализа с высоким пространственно-временным разрешением, которые дают более детальное описание междесятилетней изменчивости анализируемых полей [15, 16]. Тем не менее, вопрос об относительной роли различных факторов в формировании наблюдаемых долговременных измене-

ний гидролого-гидрохимической структуры вод моря остается открытым [15].

Таким образом, опубликованы различные результаты исследования тенденций гидролого-гидрохимического состояния вод в области западного, восточного круговорота и в районе свала глубин за период, начиная с середины 20-го века и по 2020 гг. В связи с этим, авторами настоящей работы анализируются тренды и долгопериодная изменчивость солености и концентрации растворенного кислорода на горизонтах 50 и 75 м в районе западного и восточного круговоротов Черного моря, а также в области свала глубин у северо-западного шельфа за последние 65 лет с использованием архивного массива данных.

Исходные данные и методика их обработки. Анализ проводился на основании данных, полученных на горизонтах 50 и 75 м в области западного и восточного круговоротов Черного моря, а также в районе свала глубин у северо-западного шельфа (рис. 1). Использовались данные по концентрации растворенного кислорода и солености с 1923 по 2020 гг., полученные как в результате судовых наблюдений, так и измеренные буйами-профилемерами ARGO, и накопленные в банке данных Института природно-технических систем [17]. На рис. 2 и 3 представлено количество используемых данных.

Данные осреднялись по трем областям: западной и восточной частям моря (в окрестности куполообразного подъема изооксиген, связанного с циклонической циркуляцией вод Черного моря, которая формирует два полузамкнутых круговорота), а также в районе свала глубин у северо-западного шельфа, где выполнено достаточно большое количество измерений (рис. 1).

По каждой рассматриваемой области проводилось осреднение данных на горизонтах 50 и 75 м за каждый год простым арифметическим суммированием и делением полученной величины на количество независимых измерений. Более сложные процедуры осреднения нецеле-

сообразно использовать из-за небольших размеров выбранных областей, по которым производилось осреднение.

При построении климатических полей концентрации растворенного кислорода на акватории Черного моря использовались все данные наблюдений, прошедшие контроль качества и проинтерполированные в узлы регулярной сетки с помощью процедуры оптимальной интерполяции. Для анализа были использованы климатические данные (т. е. данные за все месяцы), так как сезонная изменчивость на горизонтах 50 и 75 м отсутствует [18].

На протяжении рассматриваемого периода (1923–2020 гг.) концентрация растворенного кислорода в основном измерялась методом Винклера. Этот традиционный метод до сих пор считается самым точным и практичным методом для определения концентрации растворенного кислорода, несмотря на то, что существуют современные автоматизированные методы определения этой характеристики. При определении высоких значений концентраций кислорода методом Винклера погрешность составляет ~ 1%, но при определении низких величин может возрастать до 30% [19].

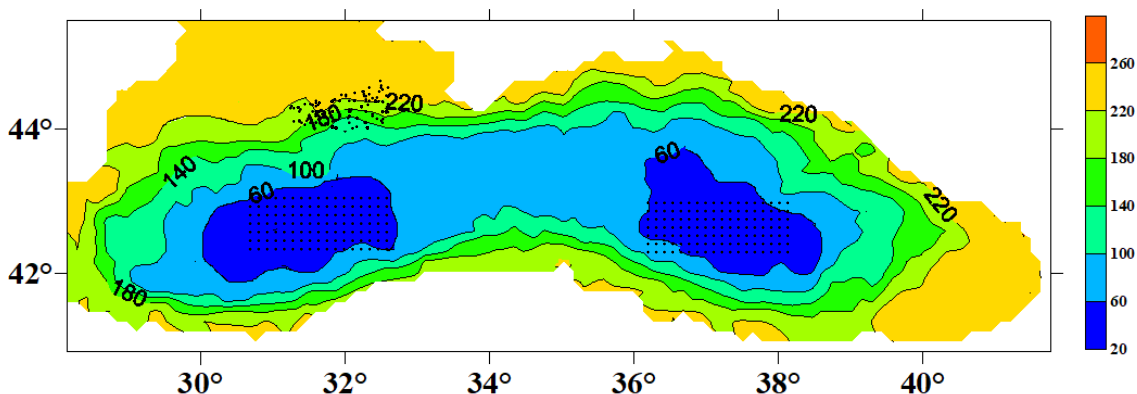


Рис. 1. Пространственное распределение поля концентрации растворенного кислорода (μM), полученное по всем данным с 1955 по 2020 гг. на горизонте 75 м.

Черными точками показаны области, для которых проводился анализ

Fig. 1. Spatial distribution of the dissolved oxygen concentration field (μM), obtained from all data from 1955 to 2020 at the horizon of 75 m.

Black dots are the areas for which the analysis was carried out

Результаты, их анализ и обсуждение. Климатические поля концентрации растворенного кислорода в водах Черного моря, построенные по проинтерполированным в узлы регулярной сетки значениям растворенного кислорода в окрестности ХПС, подтверждают, что в целом по морю в этом слое имеется ярко выраженное увеличение концентрации растворенного кислорода от глубоководной части к берегам (рис. 1). Полученное пространственное распределение обусловлено наличием Основного Черноморского течения, которое образует два полузамкнутых циклонических кру-

говоротов и способствует подъему промежуточных и глубинных вод в центре моря и опусканию подповерхностных вод на его периферии. В результате в центральной части моря в окрестность ХПС выносятся воды с более низким содержанием концентрации растворенного кислорода, а на периферии круговоротов на соответствующие горизонты опускаются обогащенные кислородом приповерхностные воды. Это процесс и приводит к формированию характерного пространственного распределения концентрации растворенного кислорода, приведенного, в частности, на рис. 1.

Представленное на рис. 1 поле соответствует опубликованным данным, лишь незначительно уточняя их [1, 8–10]. Отличительная особенность в поле концентрации растворенного кислорода в Черном море сопровождается характерным пространственным распределением упорядоченных вертикальных движений [1, 14].

Оно заключается в повышении солёности в центральных частях западного и восточного циклонических круговоротов и понижением солёности на их периферии, что также обусловлено пространственным распределением упорядоченных вертикальных движений [1, 14].

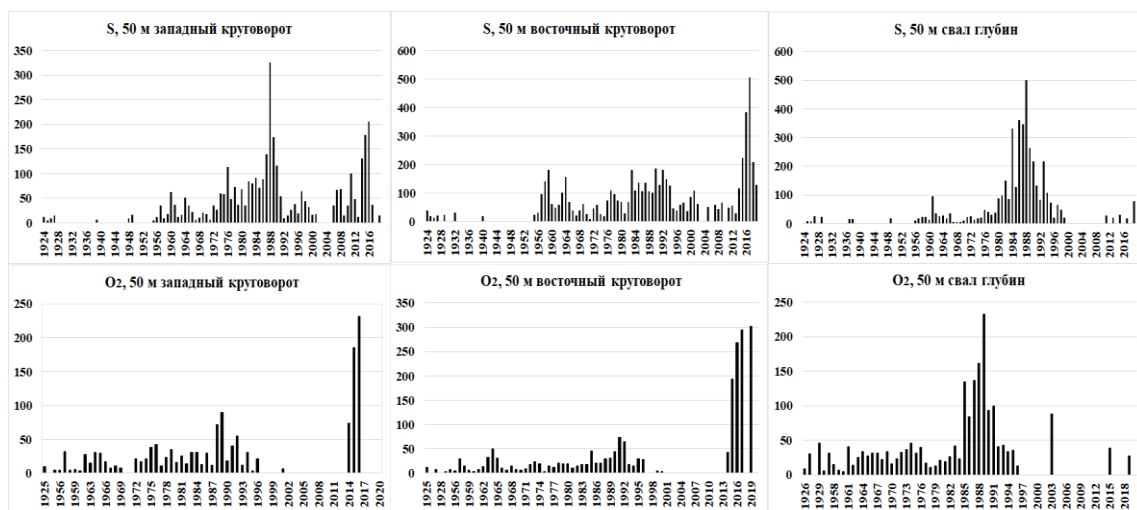


Рис. 2. Количество данных по годам на горизонте 50 м по солёности и концентрации растворенного кислорода в районе западного, восточного круговоротов Черного моря и на свале глубин в его северо-западной части

Fig. 2. Amount of data for years on a 50 m horizon on salinity and concentration of dissolved oxygen in the area of the Black Sea western and eastern gyres and its north-western slope

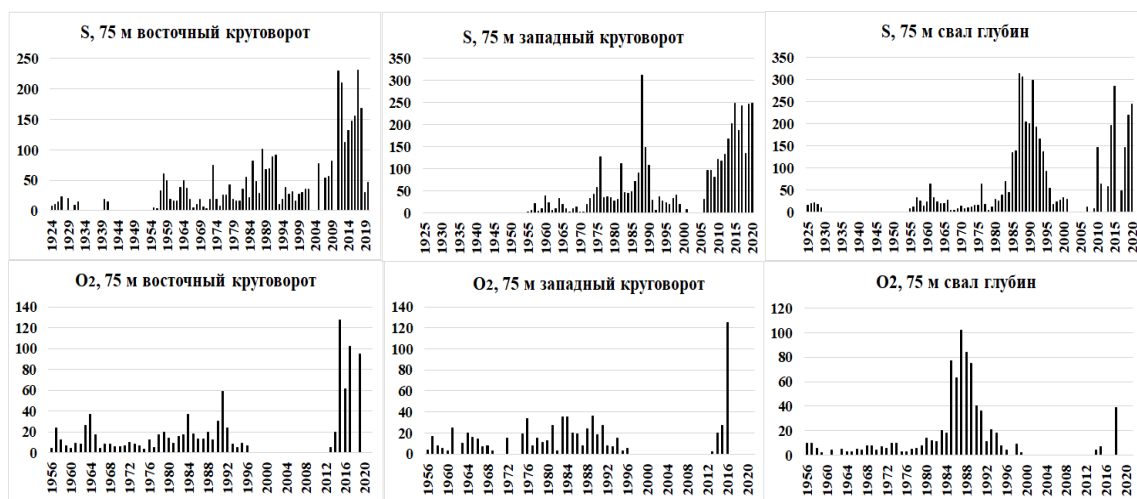


Рис. 3. То же, что и на рис. 2, но для горизонта 75 м

Fig. 3. The same as in Fig. 2, but at the 75 m horizon

В ряде опубликованных работ показано, что вертикальная стратификация в области верхней части пикноклина зна-

чительно обострилась с середины 20-го века. Главной причиной обострения стратификации называлось понижение солёности

сти верхнего перемешенного слоя и ее повышение в области промежуточных вод. По мнению некоторых авторов, это и привело к ослаблению вертикального перемешивания вод и понижению интенсивности обновления ХПС [8, 14]. Именно этот процесс (наряду с потеплением верхнего слоя вод) мог послужить основной причиной падения концентрации растворенного кислорода в окрестности ХПС. Вместе с тем, интенсификация циклонических круговоротов также могла быть причиной такого падения в центральных частях круговоротов. Ряд опубликованных данных указывает на реалистичность такого механизма [14]. Однако, в отличие от ослабления вертикального перемешивания, этот механизм должен приводить к увеличению концентрации растворенного кислорода и понижению солености в подповерхностном и промежуточном слоях на периферии циклонических круговоротов. Именно это различие и служит маркером, указывающим на действенность того или другого механизма. Использо-

вание в качестве такого маркера тенденции изменения температуры на горизонтах 50 и 75 м нецелесообразно. Это связано с тем, что ядро ХПС располагается вблизи этих горизонтов и тенденции изменения температуры, связанные с однонаправленным изменением интенсивности вертикальных движений, могут менять знак в разные периоды времени и в разных частях акватории моря [1, 5, 20].

Выявленная нами долгопериодная изменчивость солености и концентрации растворенного кислорода для центральных областей западного и восточного циклонических круговоротов характеризуется следующими особенностями. На горизонте 50 м наблюдается статистически значимый на 95% уровне рост солености в области западного и восточного круговоротов. При этом, концентрация растворенного кислорода понижается, а сам тренд кислорода как в западном, так и в восточном круговороте значим на 99% уровне (рис. 4, табл. 1).

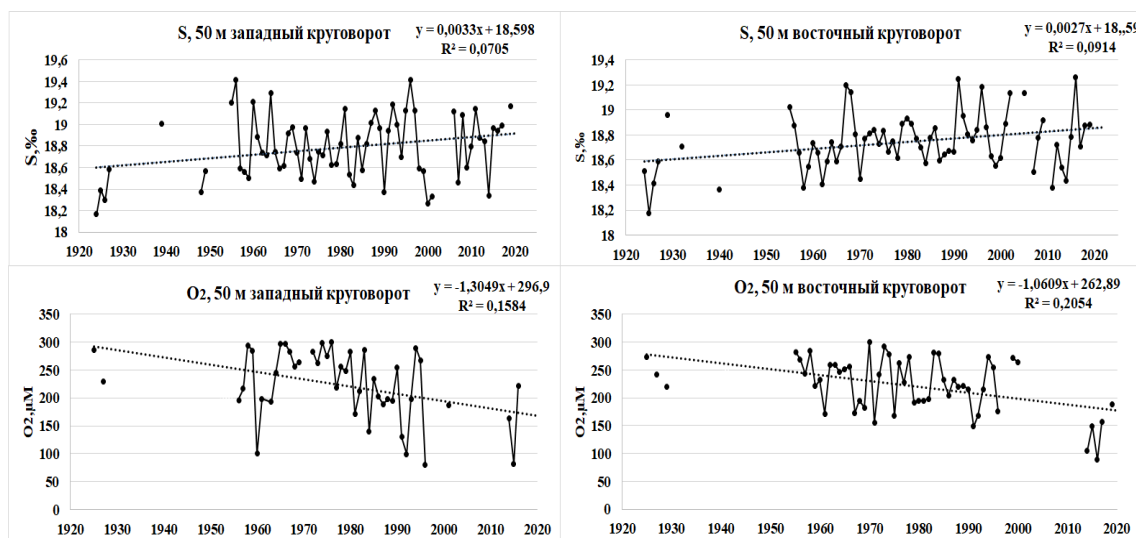


Рис. 4. Временной ход среднегодовых значений солености и концентрации растворенного кислорода на горизонте 50 м для центральных частей западного и восточного циклонических круговоротов Черного моря. Пунктирная прямая – линейный тренд
Fig. 4. Time course of the average annual values of salinity and concentration of dissolved oxygen at the 50 m horizon for the central parts of the western and eastern cyclonic gyres of the Black Sea. Dotted line - linear trend

Таблица 1. Основные характеристики временных рядов солёности и концентрации растворенного кислорода в районе западного, восточного круговоротов и свала глубин, осредненные по соответствующим частям акватории Черного моря, и тренды среднегодовых величин, оцененные по архивным данным за период 1923–2020 гг.

Горизонт, м	Западный круговорот			
	S, ‰	O ₂ , µM	S, ‰	O ₂ , µM
	Среднемноголетнее значение		Коэффициент линейного тренда	
50	18,79	224,4	0,0033**	-1,30*
75	19,87	75,4	0,0056*	-1,92*
Горизонт, м	Восточный круговорот			
	S, ‰	O ₂ , µM	S, ‰	O ₂ , µM
	Среднемноголетнее значение		Коэффициент линейного тренда	
50	18,74	223	0,0027**	-1,06*
75	19,60	80,9	0,0051*	-1,60*
Горизонт, м	Свал глубин			
	S, ‰	O ₂ , µM	S, ‰	O ₂ , µM
	Среднемноголетнее значение		Коэффициент линейного тренда	
50	18,62	298,1	-0,001	-0,20
75	19,03	248,6	-0,0065*	0,39**

* – статистически значимые на 99%-ом доверительном уровне коэффициенты линейных трендов

** – статистически значимые на 95%-ом доверительном уровне коэффициенты линейных трендов

На горизонте 75 м в области западного и восточного циклонических круговоротов также наблюдаются положительные линейные тренды солёности, которые выделяются здесь на уровне 99%-го доверительного интервала. Концентрация растворенного кислорода в этих областях характеризуется значимым на 99%-ом уровне отрицательным трендом (рис. 5, табл. 1). Полученные тренды не противоречат гипотезе о важной роли вертикальных движений в формировании долгопериодных изменений гидролого-гидрохимических характеристик в окрестности ХПС. Для подтверждения этого результата необходимо проверить знак трендов по данным о различных гидролого-гидрохимических характеристиках, полученным на свале глубин.

В районе свала глубин в северо-западной части моря на горизонте 50 м

тренды солёности и концентрации растворенного кислорода незначимы (табл. 1). Вместе с тем, на горизонте 75 м выделяются значимый на 99%-ом доверительном уровне отрицательный тренд в поле солёности и положительный (значимые на 95%-ом уровне) тренд концентрации растворенного кислорода (рис. 6, табл. 1).

Согласно результатам расчетов, значимый рост солёности на горизонте 50 м за 65 лет в западном/восточном круговороте составил 0,21/0,18‰, а на горизонте 75 м – соответственно 0,36/0,33‰. При этом в районе свала глубин на горизонте 50 и 75 м наблюдается понижение солёности на -0,07‰ и -0,42‰ (на 75 м падение солёности значимо на 99%-ом доверительном уровне, на 50 м – не значимо; табл. 2).

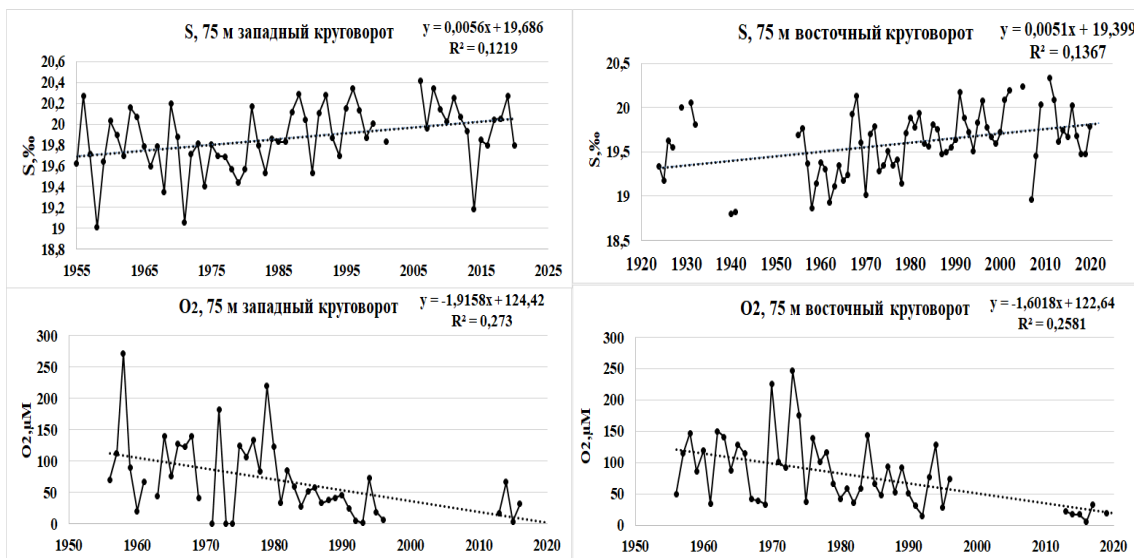


Рис. 5. То же, что и на рис. 4, но для горизонта 75 м
 Fig. 5. The same as in Fig. 4, but at the 75 m horizon

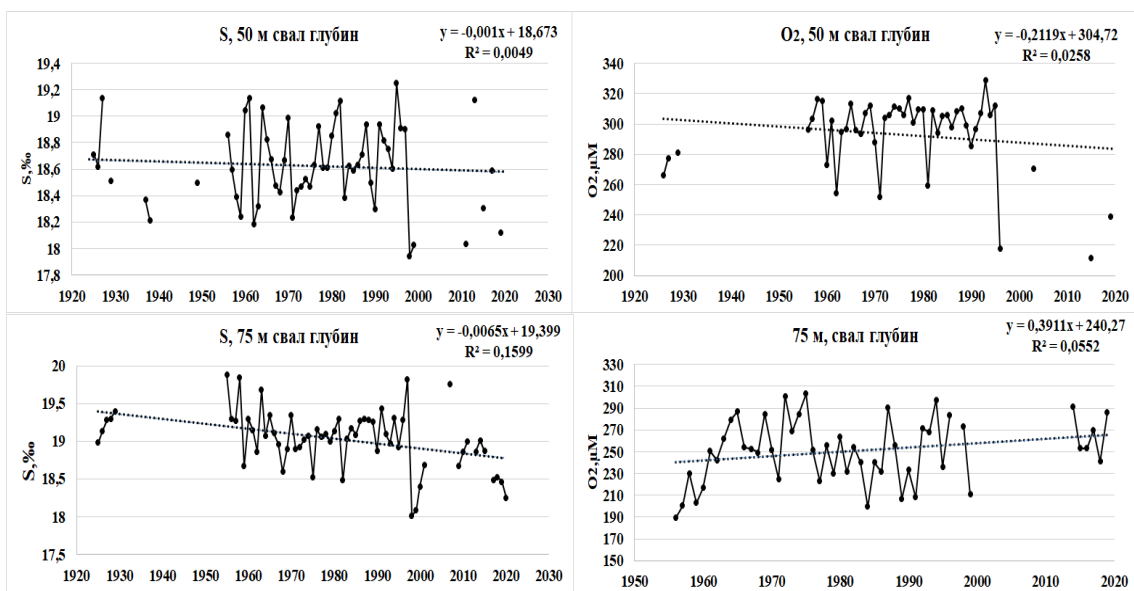


Рис. 6. Временной ход среднегодовых значений солёности и концентрации растворенного кислорода на горизонтах 50 и 75 м в районе свала глубин. Пунктирная прямая – линейный тренд
 Fig. 6. The time course of the average annual values of salinity and concentration of dissolved oxygen at the 50 and 75 m horizons in the area of the continental slope. The dotted straight line is a linear trend

Анализ трендов по данным о концентрации растворенного кислорода в центрах циклонических круговоротов за 65 лет показал следующее (табл. 1 и 2). На горизонте 50 м концентрация растворенного кислорода значимо (на 99%-ом доверительном уровне) снизилась за этот период – на 84,8 μM в западном круговороте и на 69 μM в восточном. На гори-

зонте 75 м концентрация растворенного кислорода также понизилась. Максимальное понижение концентрации растворенного кислорода обнаруживается на этой глубине в западном круговороте, где оно составило 124,5 μM , при этом в восточном – она упала на 104 μM . Оба результата значимы на 99%-ом доверительном уровне.

Таблица 2. Рост/падение (со знаком +/-) солености и концентрации растворенного кислорода за 65 лет

Горизонт, м	Западный круговорот		Восточный круговорот		Свал глубин	
	S, ‰	O ₂ , μM	S, ‰	O ₂ , μM	S, ‰	O ₂ , μM
50	0,21**	-84,80*	0,18**	-69,0*	-0,07	-13,0
75	0,36*	-124,50*	0,33*	-104,1*	-0,42*	25,4**

* – статистически значимые величины на 99%-ом доверительном уровне

** – статистически значимые величины на 95%-ом доверительном уровне

Полученные результаты свидетельствуют в пользу того факта, что циклоническая циркуляция в Черном море в целом усиливается. Иначе невозможно объяснить выделенные тренды. Поскольку главной причиной преобладания циклонической циркуляции вод в море является соответствующая завихренность в региональном поле ветра, необходимо оценить тренды этой завихренности. Выполнено довольно много оценок таких трендов по разным

типам данных и за разные периоды времени. При наличии межгодовой и междесятилетней изменчивости в завихренности поля ветра над Черным морем значительной амплитуды и недостатка долговременных данных трудно ожидать совпадение различных оценок. Тем не менее, большинство из них свидетельствуют об интенсификации циклонической завихренности в поле ветра над Черным морем в последние 40–70 лет [21, 22].

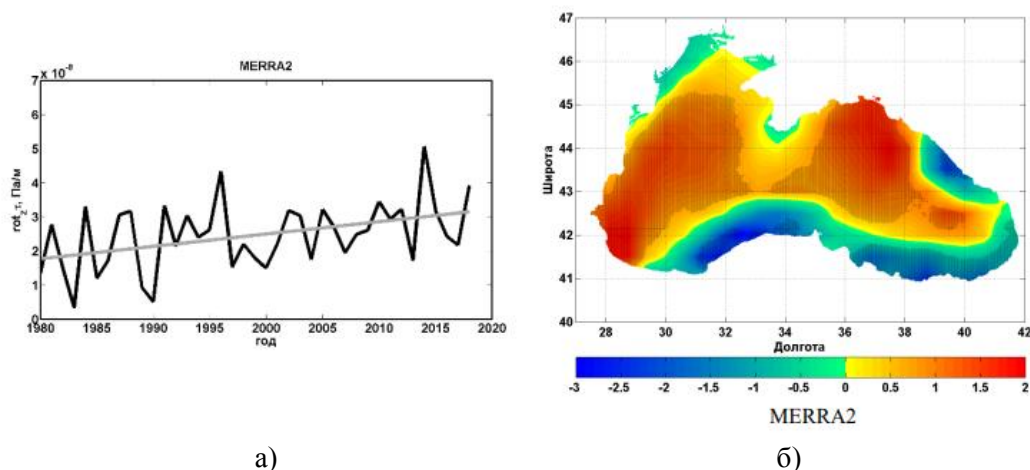


Рис. 7. Среднегодовые значения завихренности касательного напряжения трения ветра над Черным морем (а), Па/м (черная кривая) и линейный тренд (серая линия) MERRA2; пространственное распределение коэффициентов линейного тренда среднегодовой завихренности касательного напряжения трения ветра ($\times 10^{-9}$ Па/(м·год)) за период 1980–2018 гг. MERRA2. Области линейных трендов, значимых на уровне 95%, затемнены (б). Положительные значения соответствуют циклонической завихренности. Заимствовано из работы [21]

Fig. 7. Annual mean wind stress curl, averaged over the Black Sea (a), Pa/m (black line) and linear trend (gray line): MERRA2; spatial distribution of linear trend coefficients of annual mean wind stress curl ($\times 10^{-9}$ Pa/(m·year)) over 1980–2018: MERRA2. Areas of trends significant on 95% level are dotted (b). Positive values correspond to cyclonic vorticity. Borrowed from [21]

На рис. 7 приведены среднегодовые значения завихренности касательного напряжения трения ветра над Черным морем и пространственное распределение коэффициентов линейного тренда среднегодовой завихренности, рассчитанной по данным ре-анализа MERRA2.

Из рисунка видно, что в исследуемый период наблюдается увеличение циклонической завихренности, которое способствует интенсификации циркуляции в Черном море.

Таким образом, влиянием вертикальных движений на формирование наблюдаемых тенденций изменений гидролого-гидрохимических характеристик промежуточных слоев Черного моря нельзя пренебрегать.

Выводы. Основной результат настоящей работы заключается в следующем. Анализ трендов, выделенных на основе обновленных архивных данных с 1923 по 2020 гг. выявил увеличение солености, а также уменьшение концентрации растворенного кислорода в верхней части основного пикноклина в центрах западного и восточного циклонических круговоротов. На периферии отмечены противоположные тенденции. Вероятная причина такого различия – усиление завихренности поля ветра, которое приводит к интенсификации циркуляции и увеличению скорости вертикального подъема вод в центрах циклонических круговоротов и их опускания на периферии этих круговоротов.

Работа выполнена в рамках государственного задания ИПТС по теме «Фундаментальные исследования процессов в климатической системе, определяющих пространственно-временную изменчивость природной среды глобального и регионального масштабов (№ госрегистрации 121122300074-7).

Авторы выражают глубокую благодарность рецензенту за доброжелательную критику рукописи и ценные рекомендации, учет которых позволил улучшить качество статьи.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Леонов А.К.* Региональная океанография. Ч. 1. Л.: Гидрометеиздат, 1960. 754 с.
2. *Гидрометеорология и гидрохимия морей СССР.* Т. 4. Черное море. Вып. 1. Гидрометеорологические условия / под ред. А.И. Симонова, Э.И. Альтмана. Л.: Гидрометеиздат, 1991. 430 с.
3. *Tugrul S., Basturk O., Saydam C., Yilmaz A.* Changes in the hydrochemistry of the Black Sea inferred from water density profiles // *Nature.* 1992. Vol. 359. № 6391. P. 137–139.
4. *Buesseler K.O., Livingston H.D., Ivanov L.* Stability of the oxic-anoxic interface in the Black Sea // *Deep Sea Research Part I: Oceanographic Research Papers.* 1994. Vol. 41. № 2. P. 283–296.
5. *Özsoy E., Ünlüata Ü.* Oceanography of the Black Sea: a review of some recent results // *Earth-Science Reviews.* 1997. Vol. 42. № 4. P. 231–272.
6. *Stewart K., Kassakian S., Krynytzky M., DiJulio D., Murray J.W.* Oxic, suboxic, and anoxic conditions in the Black Sea // *The Black Sea flood question: Changes in coastline, climate, and human settlement.* 2007. P. 1–21.
7. *Еремеев В.Н.* К вопросу о формировании бюджета и закономерностях распределения кислорода и сероводорода в водах Черного моря // *Морской экологический журнал.* 2006. № 3. С. 5–30.
8. *Полонский А.Б., Котолупова А.А.* Долгопериодная изменчивость растворенного кислорода и температуры верхнего слоя вод Черного моря // *Океанология.* 2019. Т. 59. № 1. С. 22–32.
9. *Добржанская М.А.* Закономерности пространственного распределения кислорода на различных глубинах Черного моря // *Океанографические исследования Черного моря.* Киев: Наук. думка. 1967. С. 154–169.
10. *Шульгина Е.Ф.* Распределение кислорода в Черном море // *Комплексные гидрофизические и гидрохимические исследования Черного моря.* 1980. С. 97–111.
11. *Konovalov S.K., Murray J.W.* Variations in the chemistry of the Black Sea on a time scale of decades (1960–1995) // *J. Mar. Syst.* 2001. № 31. P. 217–243.
12. *Stanev E.V., He Y., Grayek S., Boetius A.* Oxygen dynamics in the Black Sea as seen by Argo profiling floats // *Geophysical Research Letters.* 2013. Vol. 40. № 12. P. 3085–3090.
13. *Capet A., Stanev E.V., Beckers J-M., Murray J.W., Grégoire M.* Decline of the Black Sea oxygen inventory // *Biogeosciences.* 2016. Vol. 13. P. 1287–1297.

14. Полонский А.Б., Шокурова И.Г. Долговременная изменчивость температуры и солёности в Чёрном море и ее причины // Докл. НАН Украины. 2013. № 1. С. 105–110.
15. Miladinova S., Stips A., Garcia-Gorriz E., Macias Moy D. Black Sea thermohaline properties: Long-term trends and variations // J. Geophys. Res. Oceans. 2017. № 122(7). P. 5624–5644. doi: 10.1002/2016JC012644
16. Lima L., Ciliberti S.A., Aydogdu A. Climate Signals in the Black Sea from a Multidecadal Eddy-Resolving Reanalysis // Frontiers in Marine Science. 2021. Vol. 8. P.710973. doi: 10.3389/fmars.2021.710973
17. Мельников В.В., Полонский А.Б., Котолупова А.А. GIS Института природно-технических систем // Системы контроля окружающей среды. 2016. № 4 (24). С. 149–152.
18. Полонский А.Б., Огородова А.А. Пространственно-временная изменчивость поля кислорода в глубоководной части Черного моря в зимний период // Системы контроля окружающей среды. 2015. № 2 (22). С. 74–79.
19. Каверин А.В. Химический метод Винклера для определения растворенного кислорода. 2014. <http://www.novedu.ru/winkler.htm>. Дата обращения: 12.04.2023.
20. Shapiro G.I., Aleynik D.L., Mee L.D. Long term trends in the sea surface temperature of the Black Sea // Ocean Science. 2010. Vol. 6. №. 2. Pp. 491-501.
21. Аверьянова Е.А., Губарев А.В., Полонский А.Б. О пространственно-временной изменчивости и трендах завихренности касательного напряжения трения ветра в Черном море // Системы контроля окружающей среды. 2020. № 1 (39). С. 27–36.
22. Шокурова И.Г. Межгодовая изменчивость завихренности напряжения трения ветра в Черном море // Сборник трудов Международной молодежной школы и конференции по вычислительно-информационным технологиям для наук об окружающей среде, Москва, 27 мая – 06 июня 2019 г. CITES'2019. 2019. С. 332–335.

ON REASONS OF THE LONG-TERM TRENDS IN THE VARIABILITY OF THE DISSOLVED OXYGEN CONCENTRATION AND SALINITY IN THE AREA OF THE COLD INTERMEDIATE LAYER OF THE BLACK SEA

A.A. Valle, A.B. Polonsky

Institute of Natural and Technical Systems, RF, Sevastopol, Lenin St., 28

According to archival data for the period from 1923 to 2020, the spatio-temporal variability of salinity and concentration of dissolved oxygen in the Black Sea at the 50 and 75 m horizons is analyzed. It is shown that a long-term decreasing trend in the dissolved oxygen and simultaneous increase in salinity in the area of the cold intermediate layer in the central and western parts of the cyclonic gyres is accompanied by an increase in saturation of water with oxygen at the depth slope in the region of the northwestern part of the sea and a decrease in salinity (near the horizon of 75 m). This indicates the important role of the intensification of vertical movements in the formation of the spatio-temporal variability of the dissolved oxygen in the waters of the Black Sea on interdecadal scales.

Keywords: concentration of dissolved oxygen, salinity, long-term variability, western and eastern cyclonic gyres, depth slope.

REFERENCES

1. Leonov A.K. Regional'naya okeanografiya. Chast' 1 (Regional oceanography. Part 1.) Leningrad: Gidrometeoizdat, 1960, 754 p.
2. Gidrometeorologija i gidrohimija morej SSSR. T. 4. (Hydrometeorology and hydrochemistry of the seas of the USSR. Vol. 4.) Chernoe more. Vyp. 1. Gidrometeorologicheskie uslovija pod red. A.I. Simonova, Je.I. Al'tmana. Leningrad: Gidrometeoizdat, 1991, 430 p.

3. Tugrul S., Basturk O., Saydam C., and Yilmaz A. Changes in the hydrochemistry of the Black Sea inferred from water density profiles. *Nature*, 1992, Vol. 359, No. 6391, pp. 137–139.
4. Buesseler K.O., Livingston H.D., and Ivanov L. Stability of the oxic-anoxic interface in the Black Sea. *Deep Sea Research Part I: Oceanographic Research Papers*, 1994, Vol. 41, No. 2, pp. 283–296.
5. Özsoy E. and Ünlüata Ü. Oceanography of the Black Sea: a review of some recent results. *Earth-Science Reviews*, 1997, Vol. 42, No. 4, pp. 231–272.
6. Stewart K., Kassakian S., Krynytzky M., DiJulio D., and Murray J.W. Oxidic, suboxic, and anoxic conditions in the Black Sea. *The Black Sea flood question: Changes in coastline, climate, and human settlement*, 2007, pp. 1–21.
7. Ereemeev V.N. K voprosu o formirovaniy byudzheta i zakonmernostyah raspredeleniya kisloroda i serovodoroda v vodah Chernogo morya (On the issue of budget formation and patterns of distribution of oxygen and hydrogen sulfide in the waters of the Black Sea). *Morskoj ekologicheskij zhurnal*, 2006, No. 3, pp. 5–30.
8. Polonskij A.B. and Kotolupova A.A. Dolgoperiodnaya izmenchivost' rastvorennogo kisloroda i temperatury verhnego sloya vod Chernogo morya (Long-term variability of dissolved oxygen and temperature of the upper layer of the Black Sea waters). *Okeanologiya*, 2019, Vol. 59, No. 1, pp. 22–32.
9. Dobrzhanskaya M.A. Zakonomernosti prostranstvennogo raspredeleniya kisloroda na razlichnyh glubinah Chernogo morya (Patterns of the spatial distribution of oxygen at various depths of the Black Sea). *Okeanograficheskie issledovaniya Chernogo morya*. Kiev, Naukova dumka, 1967, pp. 154–169.
10. Shul'gina E.F. Raspredelenie kisloroda v Chernom more (Distribution of oxygen in the Black Sea). *Kompleksnye gidrofizicheskie i gidrohimicheskie issledovaniya Chernogo moray*, 1980, pp. 97–111.
11. Kononov S.K. and Murray J.W. Variations in the chemistry of the Black Sea on a time scale of decades (1960–1995). *Journal of Marine Systems*, 2001, No. 31, pp. 217–243.
12. Stanev E.V., He Y., Grayek S., and Boetius A. Oxygen dynamics in the Black Sea as seen by Argo profiling floats. *Geophysical Research Letters*, 2013, Vol. 40, No. 12, pp. 3085–3090.
13. Capet A., Stanev E.V., Beckers J.-M., Murray J.W., and Grégoire M. Decline of the Black Sea oxygen inventory. *Biogeosciences*, 2016, Vol. 13, pp.1287–1297.
14. Polonskij A.B. and Shokurova I.G. Dolgovremennaya izmenchivost' temperatury i solenosti v Chyornom more i ee prichiny (Long-term variability of temperature and salinity in the Black Sea and its causes). *Doklady NAN Ukrainy*, 2013, No. 1, pp. 105–110.
15. Miladinova S., Stips A., Garcia-Gorritz E., and Macias Moy D. Black Sea thermohaline properties: Long-term trends and variations. *Journal of Geophys*, 2017, No. 122 (7), pp. 5624–5644. doi: 10.1002/2016JC012644
16. Lima L., Ciliberti S.A., and Aydogdu A. Climate Signals in the Black Sea from a Multidecadal Eddy-Resolving Reanalysis. *Frontiers in Marine Science*, 2021, Vol. 8, pp. 710973. doi: 10.3389/fmars.2021.710973
17. Mel'nikov V.V., Polonskij A.B., and Kotolupova A.A. GIS Instituta prirodno-tehnicheskikh system (GIS of the Institute of Natural and Technical Systems). *Sistemy kontrolya okruzhayushchej sredy*, 2016, No. 4 (24), pp. 149–152.
18. Polonskij A.B. and Ogorodova A.A. Prostranstvenno-vremennaya izmenchivost' polya kisloroda v glubokovodnoj chasti Chernogo morya v zimnij period (Spatial-temporal variability of the oxygen field in the deep-water part of the Black Sea in winter). *Sistemy kontrolya okruzhayushchej sredy*, 2015, No. 2 (22), pp. 74–79.
19. <http://www.novedu.ru/winkler.htm> (April 04, 2023).
20. Shapiro G.I., Aleynik D.L., and Mee L.D. Long term trends in the sea surface temperature of the Black Sea. *Ocean Science*, 2010, Vol. 6, No. 2, pp. 491–501.
21. Aver'yanova E.A., Gubarev A.V., and Polonskij A.B. O prostranstvenno-vremennoj izmenchivosti i trendah zavihrennosti kasatel'nogo napryazheniya treniya vetra v Chernom more (On spatio-temporal variability and trends of wind stress vorticity in the Black Sea). *Sistemy kontrolya okruzhayushchej sredy*, 2020, No. 1 (39), pp. 27–36.
22. Shokurova I.G. Mezhdunodovaya izmenchivost' zavihrennosti napryazheniya treniya vetra v Chernom more (Interannual Variability of Wind Stress Curl in the Black Sea). *Sbornik trudov Mezhdunarodnoj molodezhnoj shkoly i konferencii po vychislitel'no-informacionnym tekhnologiyam dlya nauk ob okruzhayushchej srede*, Moskva, 27 maya – 06 iyunya 2019 g. CITES'2019, 2019, pp. 332–335.