



## ДОЛГОВРЕМЕННЫЕ ТЕНДЕНЦИИ В ИЗМЕНЧИВОСТИ КОНЦЕНТРАЦИИ РАСТВОРЕННОГО КИСЛОРОДА И СОЛЕННОСТИ ПОД ХОЛОДНЫМ ПРОМЕЖУТОЧНЫМ СЛОЕМ ВОД ЧЕРНОГО МОРЯ

А.А. Валле

Институт природно-технических систем,  
РФ, г. Севастополь, ул. Ленина, 28  
E-mail: [ogorodovaa.a@mail.ru](mailto:ogorodovaa.a@mail.ru)

По архивным данным за период с 1924 по 2020 гг. анализируется пространственно-временная изменчивость солёности и концентрации растворенного кислорода в Черном море на горизонте 100 м. Показано, что в области западного и восточного циклонических круговоротов под холодным промежуточным слоем наблюдается долгопериодное понижение концентрации растворенного кислорода и одновременное повышение солёности, которое сопровождается ростом концентрации растворенного кислорода в районе свала глубин и падением солёности.

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

Поступила в редакцию: 10.11.2023. После доработки: 21.12.2023.

**Введение.** Опубликованы работы, оценивающие трендовые составляющие изменчивости концентрации растворенного кислорода и солёности в верхнем перемешанном слое Черного моря и анализирующие вызывающие их факторы [1–5]. Эти работы имели эпизодический характер. Исследования проводились в разных районах Черного моря и за разные периоды времени. В связи с этим автор данной работы анализирует тренды и долгопериодную изменчивость концентрации растворенного кислорода и солёности на горизонте 100 м в области западного, восточного круговоротов, а также в области свала глубин за период ~65 лет.

Данная работа является продолжением работы [6], в которой проводился анализ трендов и долгопериодной изменчивости концентрации растворенного кислорода и солёности на горизонте 50 и 75 м.

**Исходные данные и методика их обработки.** Анализ проводился на основании данных, полученных на горизонте 100 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 кисло-

рода и солёности с 1924 по 2020 гг., полученные как в результате судовых наблюдений, так и измеренные буями-профилемерами ARGO, и накопленные в банке данных Института природно-технических систем [7]. На рис. 1 представлено количество используемых данных за период 1955–2020 гг.

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 горизонте 100 м за каждый год простым арифметическим суммированием и делением полученной величины на количество независимых измерений. Более сложные процедуры осреднения нецелесообразно использовать из-за небольших размеров выбранных областей, по которым производилось осреднение.

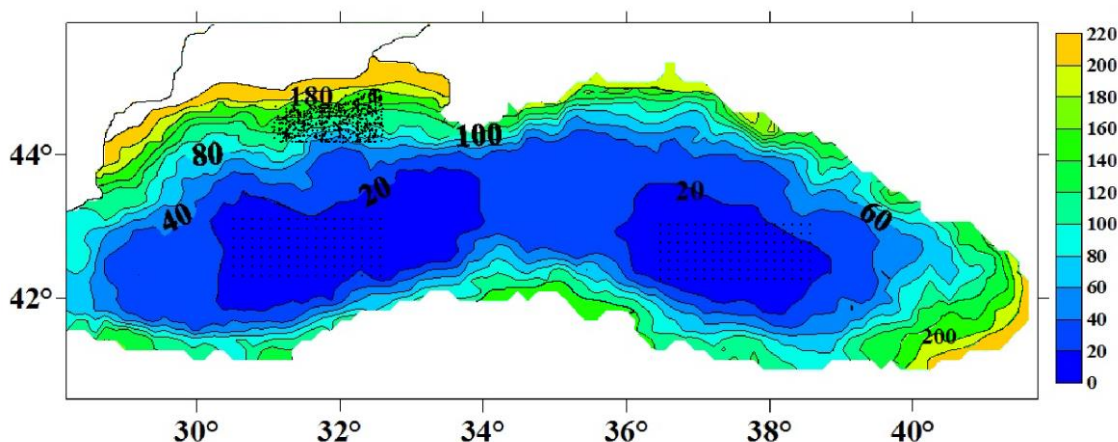
При построении климатических полей концентрации растворенного кислорода на акватории Черного моря исполь-

зовались 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 горизонте 100 м отсутствует [8].

На протяжении рассматриваемого периода 1924–2020 гг. концентрация растворенного кислорода в основном

измерялась методом Винклера. Это традиционный метод, который достаточно точен для определения концентраций растворенного кислорода превышающих 20–30  $\mu\text{M}$ . Погрешность в этом случае составляет порядка 10% и менее.

Погрешность измерений концентрации растворенного кислорода буями-профилемерами может изменяться в разных условиях почти на порядок, но не превышает 3  $\mu\text{M}$  [9, 10].



**Рис. 1.** Пространственное распределение поля концентрации растворенного кислорода ( $\mu\text{M}$ ), полученное по всем данным с 1955 по 2020 гг. на горизонте 100 м.

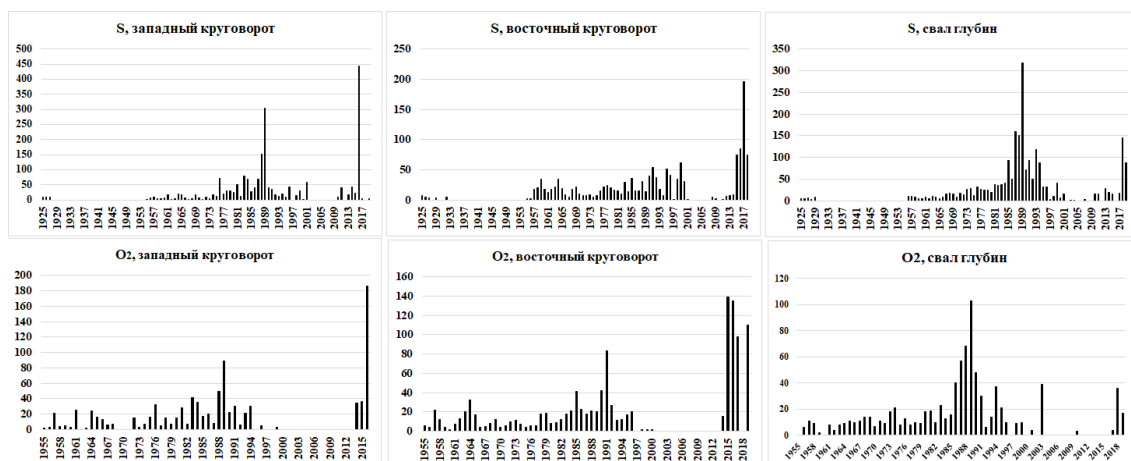
**Fig. 1.** Spatial distribution of the dissolved oxygen concentration field ( $\mu\text{M}$ ), obtained from all data from 1955 to 2020 at the horizon of 100 m. Black dots are the areas for which the analysis was carried out

**Результаты, их анализ и обсуждение.** На рис. 1 представлено климатическое поле концентрации растворенного кислорода, которое построено по проинтерполированным в узлы регулярной сети значениям. Из рис. 1 хорошо видно, что на горизонте 100 м концентрация растворенного кислорода увеличивается от центров круговоротов к берегам.

Благодаря Основному Черноморскому течению образуются два полузамкнутых циклонических круговоротов, которые способствуют подъему промежуточных и глубинных вод в центре моря и опусканию подповерхностных вод на его периферии. В результате в центральной части моря выносятся воды с более низ-

ким содержанием концентрации растворенного кислорода, а на периферии круговоротов опускаются обогащенные кислородом приповерхностные воды (рис. 1). Полученное поле распределения растворенного кислорода на рис.1 подтверждает ранее опубликованные данные [11, 12].

В пространственном распределении солености наблюдается, благодаря Основному Черноморскому течению, следующее распределение. В центре западного и восточного круговоротов выносятся воды с высокой соленостью, а на периферии – воды с пониженной соленостью [1].

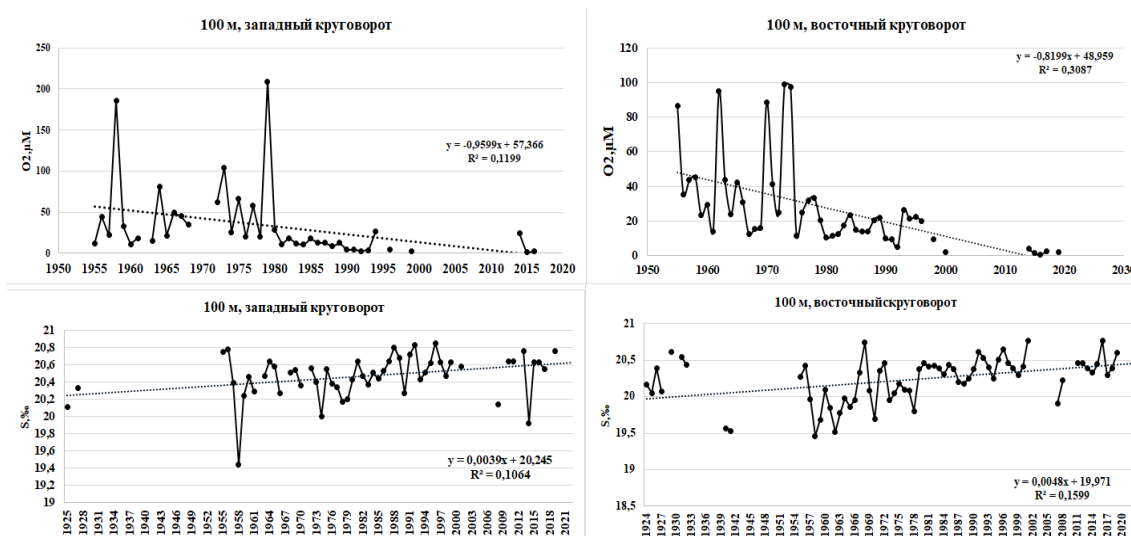


**Рис. 2.** Количество данных по годам на горизонте 100 м по солености и концентрации растворенного кислорода в районе западного, восточного круговоротов Черного моря и на свале глубин в его северо-западной части

**Fig. 2.** Amount of data for years on a 100 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

Выявленная нами долгопериодная изменчивость солености и концентрации растворенного кислорода для центральных областей западного и восточного циклонических круговоротов характеризуется следующими особенностями. На горизонте 100 м наблюдается статисти-

чески значимый на 99% 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. 3, табл. 1).



**Рис. 3.** Временной ход среднегодовых значений солености и концентрации растворенного кислорода на горизонте 100 м для центральных частей западного и восточного циклонических круговоротов Черного моря. Пунктирная прямая – линейный тренд

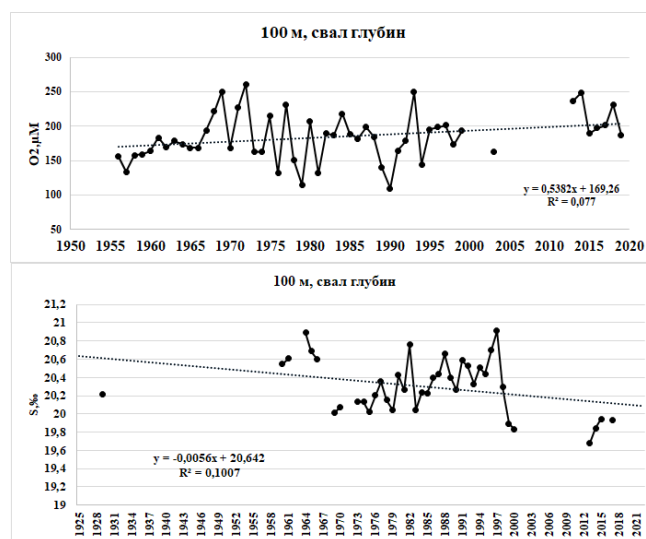
**Fig. 3.** Time course of the average annual values of salinity and concentration of dissolved oxygen at the 100 m horizon for the central parts of the western and eastern cyclonic gyres of the Black Sea. Dotted line – linear trend

**Таблица 1.** Основные характеристики временных рядов солености 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 1924–2020 гг.

Западный круговорот			
S, ‰	O <sub>2</sub> , μM	S, ‰	O <sub>2</sub> , μM
Среднегодовое значение		Коэффициент линейного тренда	
20,49	33,16	<b>0,004*</b>	<b>-0,96*</b>
Восточный круговорот			
S, ‰	O <sub>2</sub> , μM	S, ‰	O <sub>2</sub> , μM
Среднегодовое значение		Коэффициент линейного тренда	
20,24	27,14	<b>0,005*</b>	<b>-0,82*</b>
Свал глубин			
S, ‰	O <sub>2</sub> , μM	S, ‰	O <sub>2</sub> , μM
Среднегодовое значение		Коэффициент линейного тренда	
20,3	184,43	<b>-0,006**</b>	<b>0,54**</b>

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

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



**Рис. 4.** Временной ход среднегодовых значений солености и концентрации растворенного кислорода на горизонте 100 м в районе свала глубин. Пунктирная прямая – линейный тренд  
**Fig. 4.** The time course of the average annual values of salinity and concentration of dissolved oxygen at the 100 m horizon in the area of the continental slope. The dotted straight line is a linear trend

В районе свала глубин в северо-западной части моря на горизонте 100 м тренды солености и концентрации растворенного кислорода значимы на 95%-ом уровне (рис. 4, табл. 1).

Согласно результатам расчетов, значимый рост солености на горизонте 100 м за 65 лет в западном/восточном круговороте составил 0,13/0,31‰. При этом в районе свала глубин наблюдается понижение солености на -0,36‰ (падение солености значимо на 95%-ом доверительном уровне, табл. 2).

Анализ трендов по данным о концентрации растворенного кислорода в центрах циклонических круговоротов за 65 лет показал следующее (табл. 1 и 2). На горизонте 100 м концентрация растворенного кислорода значимо (на 99%-ом доверительном уровне) снизилась за этот период – на 62,4 мкМ в западном круговороте и на 53,3 мкМ в восточном. В районе свала глубин концентрация растворенного кислорода возросла на 35 мкМ (результат значим на 95%-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 <sub>2</sub> , мкМ	S, ‰	O <sub>2</sub> , мкМ	S, ‰	O <sub>2</sub> , мкМ
100	0,13*	-62,4*	0,31*	-53,3*	-0,36**	35**

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

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

**Выводы.** На основании проведенного анализа долгопериодной изменчивости растворенного кислорода и солености на горизонте 100 м в области западного, восточного круговоротов и свала глубин можно сделать следующий вывод. С 1924 по 2020 гг. наблюдается увеличение солености и уменьшение концентрации растворенного кислорода в центрах круговоротов и соответствующее уменьшение солености на периферии и соответствующее увеличение концентрации растворенного кислорода.

*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).*

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Полонский А.Б., Шокурова И.Г. Долгопериодная изменчивость температуры пикноклина в Черном море в XX и

начале XXI столетия // Доклады НАН Украины. 2011. С. 103–110.

2. Добржанская М.А. Закономерности пространственного распределения кислорода на различных глубинах Черного моря // Океанографические исследования Черного моря. Киев: Наук. думка. 1967. С. 154–169.

3. Kononov 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. No. 31. P. 217–243.

4. Stanev E.V., He Yu., Grayek S., Boetius A. Oxygen dynamics in the Black Sea as seen by Argo profiling floats // Geophysical Research Letters. 2013. Vol. 40. No. 12. P. 3085–3090.

5. 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.

6. Валле А.А., Полонский А.Б. О причинах долговременных тенденций в изменчивости концентрации растворенного кислорода и солености в области холодного промежуточного слоя Черного

моря // Системы контроля окружающей среды. 2023. Вып. 2 (52). С. 7–17.

7. Мельников В.В., Полонский А.Б., Котолупова А.А. GIS Института природно-технических систем // Системы контроля окружающей среды. 2016. № 4 (24). С. 149–152.

8. 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.

9. Стунжас П.А., Мошаров В.Е., Радченко В.Н. Возможности фотолуминесцентного метода измерения концентрации кислорода в редокс-зоне Черного моря в сравнении с другими методами //

Океанология. 2013. Т. 53. № 4. С. 558–568.

10. Якушев Е.В., Виноградова Е.Л., Дубинин А.В., Костылева А.В., Меньшикова Н.М., Пахомова С.В. Об определении низких концентраций кислорода методом Винклера // Океанология. 2012. Т. 52. № 1. С. 131–138.

11. 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.

12. Шульгина Е.Ф. Распределение кислорода в Черном море // Комплексные гидрофизические и гидрохимические исследования Черного моря. 1980. С. 97–111.

#### LONG-TERM TRENDS IN VARIABILITY OF DISSOLVED OXYGEN AND SALINITY CONCENTRATION UNDER THE COLD INTERMEDIATE LAYER OF THE BLACK SEA WATERS

A.A. Valle

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

According to archival data for the period from 1924 to 2020 the spatiotemporal variability of salinity and dissolved oxygen concentration in the Black Sea at a horizon of 100 m is analyzed. It is shown that in the region of the western and eastern cyclonic gyres under the cold intermediate layer there is a long-period decrease in the concentration of dissolved oxygen and a simultaneous increase in salinity, which is accompanied by an increase in the concentration of dissolved oxygen in the area of the depth slope and a decrease in salinity.

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

#### REFERENCES

1. Polonskij A.B. and Shokurova I.G. Dolgovremennaya izmenchivost' temperatury piknoklina v Chernom more v XX i nachale XXI stoletiya (Long-term variability of pycnocline temperature in the Black Sea in the 20th and early 21st centuries). *Doklady NAN Ukrainy*, 2011, pp. 103–110.

2. Dobrzhanskaya M.A. Zakonomernosti prostranstvennogo raspredeleniya kisloroda na razlichnykh glubinah Chernogo morya (Patterns of the spatial distribution of oxygen at various depths of the Black Sea). *Okeanograficheskie issledovaniya Chernogo moray*, Kiev, Naukova dumka, 1967, pp. 154–169.

3. Konovalov 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.

4. 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.

5. 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.

6. Valle A.A. and Polonskij A.B. O prichinah dolgovremennykh tendencij v izmenchivosti koncentracii rastvorennoho kisloroda i solenosti v oblasti holodnogo promezhutochnogo sloya Chernogo morya (On

the reasons for long-term trends in the variability of dissolved oxygen concentration and salinity in the region of the cold intermediate layer of the Black Sea). *Sistemy kontrolya okruzhayushchej sredy*, 2023, No. 2 (52), pp. 7–17.

7. 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.

8. 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.

9. Stunzhas P.A., Mosharov V.E., and Radchenko V.N. Vozmozhnosti fotolyumi-nescentnogo metoda izmereniya koncen-tracii kisloroda v redoks-zone Chernogo morya v sravnenii s drugimi metodami (Possibilities of the photoluminescent method for measuring oxygen concentration in the redox zone of the Black Sea in comparison with other methods). *Okeanologiya*, 2013, Vol. 53, No. 4, pp. 558–568.

10. Yakushev E.V., Vinogradova E.L., Dubinin A.V., Kostyleva A.V., Men'shikova N.M., and Pahomova S.V. Ob opredelenii nizkih koncentracij kisloroda metodom Vinklera (On the determination of low oxygen concentrations by the Winkler method). *Okeanologiya*, 2012, Vol. 52, No. 1, pp. 131–138.

11. 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.

12. 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.