

УДК 541.465 (262.5)

О ПРИЧИНАХ ДОЛГОПЕРИОДНОЙ ИЗМЕНЧИВОСТИ КОНЦЕНТРАЦИИ РАСТВОРЁННОГО КИСЛОРОДА В ВЕРХНЕМ СЛОЕ ЧЁРНОГО МОРЯ

© 2024 г. Член-корреспондент РАН А. Б. Полонский*, А. А. Валле

Поступило 14.09.2023 г.

После доработки 10.01.2024 г.

Принята к публикации 15.01.2024 г.

По архивным данным за период с 1923 по 2022 гг. анализируется долгопериодная (междесятилетняя и межгодовая) изменчивость концентрации растворённого кислорода и температуры в поверхностном слое Чёрного моря в весенний гидрологический сезон (с мая по июнь). Выявлено, что с 1923 по 1932 гг. на Северо-Западном шельфе и в открытой части Чёрного моря наблюдались самые низкие концентрации кислорода за весь период инструментальных наблюдений (примерно 100 лет). Отрицательные аномалии величины растворённого кислорода превысили (по абсолютной величине) соответствующие аномалии, отмеченные в период эвтрофикации вод Чёрного моря последних десятилетий 20-го века. Основная причина обнаруженных экстремальных аномалий в 1920-е годы — повышение температуры поверхностного слоя вод Чёрного моря в этот период.

Ключевые слова: характеристики поверхностных вод Чёрного моря, концентрация растворённого кислорода, климатическая изменчивость температуры, эвтрофикация

DOI: 10.31857/S2686739724050158

ВВЕДЕНИЕ

Чёрное море — это крупнейшее в мире внутреннее море, не имеющее прямого выхода к океану, в которое поступает поверхностный сток почти с трети всей площади континентальной Европы. В результате Чёрное море подвергается постоянному интенсивному антропогенному воздействию. В течение последних нескольких десятилетий 20-го столетия возрастающее количество промышленных, сельскохозяйственных и бытовых отходов, непосредственно сбрасываемых 17-ю европейскими странами в реки, впадающие в Чёрное море, и другие виды антропогенной нагрузки привели к катастрофической деградации черноморской экосистемы. Это проявилось, в частности, в эвтрофикации вод Чёрного моря [1–6]. Признаки эвтрофикации стали проявляться в прибрежных районах Северо-Западной и западной частей Чёрного моря в конце 1960-х—начале 1970-х годов, в первую очередь, в виде увеличения массы фитопланктона,

а также, частоты и масштабов цветения водорослей. Затем эвтрофикация распространилась на весь Северо-Западный шельф моря, а позднее и на открытые участки акватории [4–9]. Эвтрофикация привела к снижению концентрации растворённого кислорода из-за большого количества разлагающегося фитопланктона. Поэтому аномальное падение концентрации растворённого кислорода иногда рассматривается в качестве одного из признаков эвтрофикации. Вместе с тем, растворимость кислорода напрямую зависит от температуры воды и варьируется в широких пределах в результате региональных климатических изменений [10]. Накопленные архивные данные за приблизительно 100-летний период позволяют проанализировать долговременные изменения концентрации растворённого кислорода и её связь не только с эвтрофикацией, но и с вариациями температуры поверхностного слоя вод Чёрного моря. Результаты краткого анализа этих данных представлены в настоящей работе. Будет показано, что около 100 лет тому назад содержание растворённого кислорода в поверхностном слое вод Чёрного моря было аномально низким и, в основном, определялось потеплением верхнего слоя вод.

Институт природно-технических систем, Севастополь, Россия

**E-mail: apolonsky5@mail.ru*

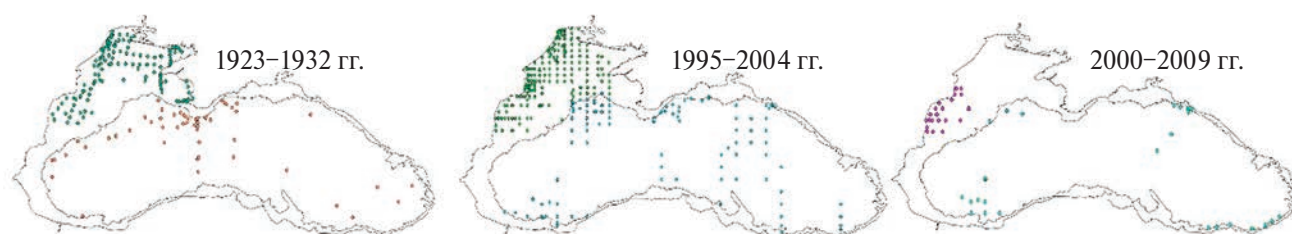


Рис. 1. Пространственное распределение данных по кислороду, растворённому в верхнем слое вод Чёрного моря, для 3-х временных периодов с наименьшей плотностью наблюдений.

ИСХОДНЫЕ ДАННЫЕ И МЕТОДИКА ИХ ОБРАБОТКИ

Анализ проводился по данным о температуре и концентрации растворённого кислорода в поверхностном слое (0–5 м) вод Чёрного моря для весеннего гидрологического сезона (с мая по июнь) с 1923 по 2022 гг. Для анализа использовались данные по концентрации растворённого кислорода и температуры, полученные как при выполнении судовых наблюдений, так и буями-профилемерами Argo из банка данных института Природно-технических систем [11]. Северо-Западный шельф и глубоководная (ограниченная изобатой 1000 м) часть моря анализировались по отдельности (рис. 1). Выбор анализируемого сезона был обусловлен хорошо известным фактом о максимальном влиянии речного стока на гидролого-гидрохимические характеристики верхнего слоя вод Чёрного моря в период с мая по июнь. Причём это влияние наиболее выражено на Северо-Западном шельфе, куда поступает около 75% всего речного стока черноморского бассейна [12–15].

Данные наблюдений распределены по акватории Чёрного моря крайне неравномерно. На Северо-Западном шельфе моря плотность наблюдательной сети существенно больше, чем в глубоководной части (табл. 1). На рис. 1 представлены наименее обеспеченные наблюдениями периоды, в целом подтверждающие этот факт.

Для анализа долгопериодных тенденций в изменении температуры и растворённого кислорода данные усреднялись по каждой области (северо-западный шельф и глубоководная акватория) за май и июнь каждого десятилетия, начиная с 1955 г. со сдвигом в 5 лет. Отдельно проводилось осреднение за период с 1923 по 1932 гг., когда было выполнено несколько широкомасштабных съёмок, позволяющих получить оценку средних величин концентрации растворённого

кислорода и температуры поверхностного слоя вод для обеих частей акватории Чёрного моря.

В рассматриваемый период (1923–2022 гг.) основным способом определения концентрации растворённого кислорода являлся метод Винклера. Типичная абсолютная погрешность этого метода составляет 10 μM [16], а относительная — изменяется от величины порядка нескольких процентов (при высоких концентрациях кислорода в сотни μM) до 30% и более (при низких концентрациях) [17]. С 2010 года появились автономные буи-профилемеры Argo, которые начали регулярно измерять концентрацию растворённого кислорода в Чёрном море в режиме зондирования. Абсолютная погрешность измерений содержания кислорода с помощью этих буйев составляет около 5 μM [18].

Пространственно-временное осреднение данных производилось двумя следующими способами. Во-первых, среднее по пространству получалось простым арифметическим осреднением всех измеренных величин по каждой из двух частей акватории моря и для каждого анализируемого периода времени (т.е., для каждого года и месяца отдельно с дальнейшим усреднением по десятилетиям). Во-вторых, вначале производилась интерполяционная процедура с использованием метода оптимальной интерполяции для каждого года и месяца отдельно. Затем полученные в узлах регулярной сетки проинтерполированные значения усреднялись по каждой из акваторий. В обоих случаях средние значения за май–июнь каждого года по обеим частям акватории получались простым усреднением среднемесячных величин. В настоящем сообщении из-за ограничений на допустимый объём статьи будут приведены результаты, полученные с использованием первого способа. Отметим вместе с тем, что основные выводы работы не зависят от способа усреднения данных измерений.

Таблица 1. Количество данных по температуре и концентрации растворённого кислорода в разные десятилетия в глубоководной части и в Северо-Западном шельфе Чёрного моря, доступных в базе данных [11]

Десятилетия	Количество лет в каждом десятилетии, охваченные измерениями				Кол-во данных			
	Глубоководная часть		Северо-Западная часть		Глубоководная часть		Северо-Западная часть	
	O ₂	T	O ₂	T	O ₂	T	O ₂	T
1923–1932	9	9	5	9	71	157	162	361
1955–1964	10	10	9	10	779	1675	550	941
1960–1969	10	10	10	10	931	1293	811	1245
1965–1974	10	10	10	10	918	995	774	1455
1970–1979	10	10	10	10	704	1130	760	3193
1975–1984	10	10	10	10	982	1389	867	4135
1980–1989	10	10	10	10	1946	3007	2014	4952
1985–1994	9	10	10	10	1651	3324	2272	4848
1990–1999	7	10	10	10	532	1234	963	2403
1995–2004	5	8	9	9	310	453	212	807
2000–2009	6	6	3	4	109	329	48	163
2005–2014	6	10	–	–	224	997	–	–
2010–2019	7	10	–	–	510	4131	–	–
2015–2022	5	10	–	–	434	4033	–	–

Кроме описанных выше архивных материалов использовались спутниковые данные о температуре поверхности моря (ТПМ), любезно предоставленные А.Н. Серебренниковым, и стандартные измерения ТПМ на морской гидрометеорологической станции в Одессе.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ АНАЛИЗ

Междесятилетний временной ход концентрации растворённого в верхнем слое вод кислорода на Северо-Западном шельфе и в глубоководной

части Чёрного моря указывает на её квазипериодическую изменчивость (рис. 2).

На Северо-Западном шельфе междесятилетняя изменчивость характеризуется следующими особенностями. В период 1923–1932 гг. наблюдались самые низкие значения растворённого кислорода – 261 мкМ. После 1932 г. и до середины 50-х годов необходимое (для надёжного выделения междесятилетних вариаций кислорода) количество данных отсутствовало. Затем, до второй половины 80-х годов содержание кислорода в верхнем слое в целом росло (до 330 мкМ, если не считать незначимого падения концентрации растворённого кислорода в одно из десятилетий этого периода). С конца 1980-х и до начала 2000-х годов происходило понижение концентрации кислорода до 290 мкМ. С начала 2000-х годов содержание растворённого кислорода увеличивается (рис. 2).

В глубоководной части Чёрного моря междесятилетняя изменчивость концентрации растворённого кислорода характеризуется закономерностями, близкими к описанным выше (рис. 2). Самые низкие концентрации кислорода (256 мкМ) были зафиксированы в глубоководной части моря в период с 1923 по 1932 гг. После 1955 года на протяжении примерно 40 лет происходил рост концентрации растворённого кислорода (до 295 мкМ), а затем началось её падение (до 267 мкМ в первом десятилетии 21 века), сменившееся продолжающимся до настоящего времени увеличением концентрации растворённого кислорода.

Вместе с тем, между глубоководной частью моря и его Северо-Западным шельфом есть два важных различия. Во-первых, в целом содержание растворённого кислорода в верхнем слое вод Северо-Западной части моря существенно больше, чем в открытой части бассейна. В 1923–1932 гг. концентрация растворённого кислорода в открытой части моря была меньше, чем на Северо-Западном шельфе на 5 мкМ. В другие десятилетия разница между концентрацией растворённого кислорода на шельфе и в глубоководной части моря доходила до величин ~35 мкМ. Во-вторых, вторичный минимум концентрации растворённого кислорода в глубоководной части моря начала 21 века наблюдался позже, чем в его Северо-Западной части. Эти факты подтверждают, что на междесятилетнюю изменчивость концентрации растворённого кислорода в Чёрном море существенное влияние действительно оказывают характеристики речного стока и эвтрофикация конца 20 века.

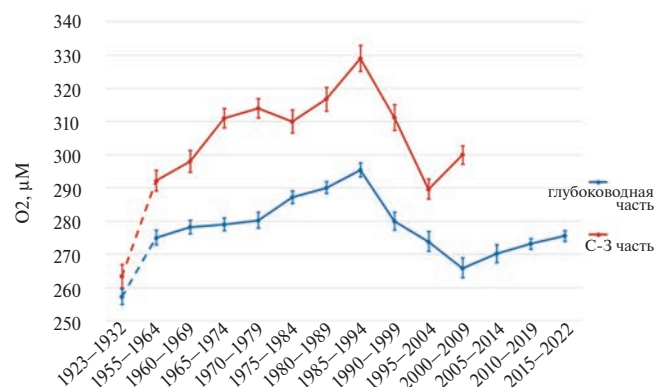


Рис. 2. Междесятилетняя изменчивость концентрации растворённого кислорода в поверхностном слое глубоководной части Чёрного моря и на Северо-Западном шельфе (показано соответственно синим и красным цветами) в мае–июне. Вертикальные отрезки — 95%-й доверительный интервал.

Для дальнейшего анализа причин долгопериодной изменчивости концентрации растворённого в поверхностном слое вод кислорода её временной ход сравнивался с вариациями температуры этого слоя.

На рис. 3 хорошо видно, что с 1923 по 1932 гг. (когда содержание кислорода в поверхностном слое было минимальным) наблюдались высокие значения ТПМ в весенний период — до 18°C и более. При этом коэффициент корреляции между межгодовыми изменениями весенней температуры поверхностного слоя вод на Северо-Западном шельфе (в глубоководной части Чёрного моря) и концентрации растворённого кислорода в 1923–1932 гг. составил -0.91 (-0.81). Такие высокие (и значимые, более чем на 95%-ом доверительном уровне) отрицательные коэффициенты корреляции между весенними вариациями температуры и концентрации кислорода, растворённого в поверхностном слое вод, не наблюдались ни в одно из последующих десятилетий. Более того, на протяжении значительной части анализируемого периода, начиная со второй половины 1950-х гг., соответствующие коэффициенты корреляции были незначимы даже на 90%-м доверительном уровне. Исключение составляет временной отрезок с конца 1980-х до первого десятилетия 2000-х гг., когда наблюдалось повышение температуры поверхностного слоя вод и понижение концентрации растворённого кислорода, а коэффициент корреляции между этими параметрами в Северо-Западной части (значимый на 90%-м доверительном уровне) достиг -0.41 .

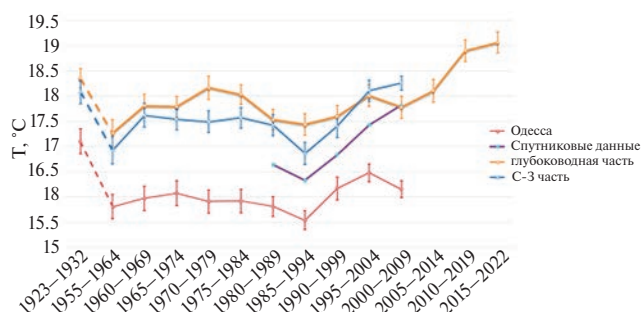


Рис. 3. Междесятилетняя изменчивость температуры поверхности в мае–июне в глубоководной части Чёрного моря и на Северо-Западном шельфе (по данным контактных измерений, показано соответственно оранжевым и синим цветами), на Северо-Западном шельфе (по спутниковым данным, показано фиолетовым цветом) и на гидрометеорологической станции в Одессе (дано красным цветом). Вертикальные отрезки — 95%-й доверительный интервал.

Отметим, что в весенне-летний период корреляция вариаций температуры и концентрации растворённого кислорода в поверхностном слое Чёрного моря (а, особенно, в его Северо-Западной части) по данным большинства авторов, проанализировавших результаты измерений второй половины 20-го века, не очень велика. Причина слабой коррелированности этих параметров между собой заключается в том, что на изменчивость поля кислорода сильно влияют вариации стока рек, характеризующихся кислородным режимом, отличным от режима вод морской акватории, а также интенсивность развития фотосинтетических и биогеохимических процессов, в значительной степени определяющих кислородный режим верхнего слоя моря [10, 19]. Поэтому максимальные абсолютные величины коэффициента корреляции между ежегодными весенними величинами ТПМ и O_2 , рассчитанные по экспериментальным данным 20–30-х гг. прошлого столетия и превышающие по абсолютной величине $0.8 \div 0.9$, можно считать нетипичными, по крайней мере, для современного климатического состояния Чёрного моря (в отличие от зимнего периода, см., например, [10]).

Подчеркнём, что до середины 90-х гг. температура поверхностного слоя вод Северо-Западной части Чёрного моря в весенний период была ниже, чем в глубоководной части моря. Затем произошло быстрое повышение температуры поверхностных вод в море, особенно выраженное на Северо-Западном шельфе. В результате в первом десятилетии 21 века температура поверхности на Северо-Западном шельфе превысила соответствующую температуру глубоководной

части моря (рис. 3). При этом концентрация растворённого кислорода в Северо-Западной части бассейна оставалась выше, чем в открытой части моря (рис. 2). Резкое падение концентрации растворённого кислорода, в большей степени связанное с эвтрофированием вод (но частично обусловленное и повышением температуры), произошло вначале на Северо-Западном шельфе, а затем и на открытой частях акватории.

Таким образом, экстремально низкие концентрации растворённого кислорода в Чёрном море в 1920-е — начале 1930-х годов главным образом явились следствием повышения температуры поверхностных вод в этот период, в отличие от эвтрофикации последних десятилетий 20-го столетия, послужившей основной причиной повторного падения концентрации растворённого кислорода. Этот результат не зависит от способа осреднения данных наблюдений и статистически значим, хотя конкретные численные оценки, конечно, зависят от процедуры усреднения.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Анализ долгопериодной изменчивости концентрации растворённого кислорода в весенний период в поверхностном слое вод глубоководной части Чёрного моря и на Северо-Западном шельфе по архивным данным 1923–2022 гг. выявил, что в этот период на всей акватории моря наблюдались самые низкие за последние 100 лет концентрации кислорода. В первую очередь, это связано с прогревом поверхностных вод в указанный период. Второй минимум концентрации растворённого кислорода приходится на конец 20-го—начало 21-го вв. Главная причина его появления — эвтрофикация вод, начавшаяся с северо-западного шельфа и распространившаяся затем на внутренние участки акватории моря. Во второй половине 20-го—начале 21-го вв. произошло очень существенное изменение в тесноте связи вариаций температуры и концентрации растворённого кислорода в поверхностном слое Чёрного моря по сравнению с 20–30-ми гг. 20-го века. В первой трети 20-го века абсолютные величины коэффициента корреляции между ежегодными весенними величинами ТПМ и O_2 превышали по абсолютной величине $0.8 \div 0.9$. Во второй половине 20-го—начале 21-го вв. соответствующий коэффициент корреляции был либо как минимум вдвое меньше, либо вообще незначим (даже на 90%-м доверительном уровне).

БЛАГОДАРНОСТИ

Выражаем искреннюю благодарность рецензенту за полезные замечания, учёт которых позволил улучшить качество рукописи.

ИСТОЧНИК ФИНАНСИРОВАНИЯ

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. Зайцев Ю. П., Гаркавая Г. П., Нестерова Д. А., Полищук Л. Н. Дунай — основной источник эвтрофирования Черного моря // Гидробиол. журн. 1989. Т. 25. Вып. 4. С. 21–23.
2. Mee L. D. The Black Sea in crisis: the need for concerted international action // Ambio. 1992. V. 21. P. 278–286.
3. Zaitsev Y. P. Impact of eutrophication on the Black Sea fauna // Etudes et Revue-Conseil General des Peches pour la Mediterranee (FAO). 1994.
4. Nixon S. W. Coastal marine eutrophication: a definition, social causes, and future concerns // Ophelia. 1995. V. 41. № 1. P. 199–219.
<https://doi.org/10.1080/00785236.1995.10422044>
5. Zaitsev Y. P., Alexandrov B. G. Recent man-made changes in the Black Sea ecosystem // Sensitivity to Change: Black Sea, Baltic Sea and North Sea. 1997. P. 25–31.
6. Vinogradov M. E., Shushkina E. A., Mikaelyan A. S., Nezlin N. P. Temporal (seasonal and interannual) changes of ecosystem of the open waters of the Black Sea. Environmental Degradation of the Black Sea, Challenges and Remedies. Dordrecht: Kluwer Academic Publishers, 1999. P. 109–129.
7. Yunev O. A., Vedernikov V. I., Basturk O. Long-term variations of surface chlorophyll-a and primary production in the open Black Sea // Marine ecology progress series. 2002. V. 230. P. 11–28.
8. Yunev O. A., Suetin V., Suslin V., Moncheva S. Long-term changes in the Black Sea surface chlorophyll-a according to in situ and modern satellite data // Elsevier Oceanography Series. Elsevier, 2003. V. 69. P. 168–173.
9. Северо-западная часть Черного моря: биология и экология / Под ред. Зайцева Ю. П., Александрова Б. Г., Миничевой Г. Г. Киев: Наукова думка. 2006. 701 с. Екосистема узмор'я Української

- дельты Дунаю / Відп. ред. Л. В. Воробйова. Одеса: Астропринт, 1998. 332 с.
10. Полонский А. Б., Котолупова А. А. О долгопериодной изменчивости кислорода, растворенного в верхнем слое вод Черного моря // ДАН. 2017. Т. 476. № 2. С. 228–232. DOI: 10.7868/S0869565217260231.
 11. 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. 49–55.
 12. Добржанская М. А. Закономерности пространственного распределения кислорода на различных глубинах Черного моря. / В сб: Океанографические исследования Черного моря. Киев: Наук. думка, 1967. С. 154–169.
 13. 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.
 14. Özsoy E., Ünlüata U. Oceanography of the Black Sea: a review of some recent results // Earth-Sci. Rev. 1997. V. 42. P. 231–272.
 15. Валле А. А., Гребнева Е. А., Полонский А. Б. Анализ сезонной изменчивости гидролого-гидрохимических характеристик поверхностных вод северо-западной части Черного моря // Системы контроля окружающей среды. 2020. № 3 (41). С. 39–48. DOI: 10.33075/2220-5861-2020-3-39-48
 16. Безбородов А. А., Еремеев В. Н. Черное море. Зона взаимодействия аэробных и анаэробных вод. Севастополь: МГИ АНУ, 1993. 299 с.
 17. Каверин А. В. Химический метод Винклера для определения растворенного кислорода. 2014. <http://masters.donntu.ru/2011/fkita/prokofeva/library/article8.htm> (дата обращения: 01.09.2023).
 18. Gruber N., Doney S. C. Adding Oxygen to Argo: Developing a Global In Situ Observatory for Ocean Deoxygenation and Biogeochemistry. 2010.
 19. Юнев О. А. Вторичная эвтрофикация черноморского шельфа // Экологическая безопасность прибрежной и шельфовой зон моря. 2020. № 2. С. 80–91. DOI: 10.22449/2413-5577-2020-2-80-91.

ON THE REASONS FOR THE LONG-TERM VARIABILITY OF THE DISSOLVED OXYGEN CONCENTRATION IN THE UPPER LAYER OF THE BLACK SEA

Corresponding Member of the RAS A. B. Polonsky[#], A. A. Valle

Institute of Natural and Technical Systems, Sevastopol, Russian Federation

[#]*E-mail: apolonsky5@mail.ru*

According to archival data for the period from 1923 to 2022 long-term (interdecadal and interannual) variability of dissolved oxygen concentration and temperature in the surface layer of the Black Sea in the spring hydrological season (from May to June) is analyzed. It was revealed that from 1923 to 1932 on the northwestern shelf and in the open part of the Black Sea, the lowest oxygen concentrations were observed over the entire period of instrumental observations (approximately 100 years). Negative anomalies in dissolved oxygen exceeded (in absolute value) the corresponding anomalies noted during the period of eutrophication of the Black Sea waters in the last decades of the 20th century. The main reason for the extreme anomalies discovered in the 1920s is the increase in the temperature of the surface layer of the Black Sea waters during this period.

Keywords: water characteristics of the Black Sea surface, dissolved oxygen concentration, climate temperature variability, eutrophication