

УДК 581.526.325.4; 577.355.3

© И. В. Ковалёва^{1*}, З. З. Финенко¹, В. В. Суслин², 2022

¹Федеральный исследовательский центр «Институт биологии южных морей имени А.О. Ковалевского РАН», пр. Нахимова, д. 2, г. Севастополь, 299011, Россия

²Морской гидрофизический институт РАН, ул. Капитанская, д. 2, г. Севастополь, 299011, Россия

*ila.82@mail.ru

ТРЕНДЫ ИЗМЕНЕНИЯ ПЕРВИЧНОЙ ПРОДУКЦИИ ФИТОПЛАНКТОНА ПО ДАННЫМ ДИСТАНЦИОННОГО ЗОНДИРОВАНИЯ В ГЛУБОКОВОДНОЙ ОБЛАСТИ ЧЕРНОГО МОРЯ В 1998–2015 ГОДЫ

Статья поступила в редакцию 16.10.2021, после доработки 30.06.2022, принята в печать 16.09.2022

Аннотация

Проведен анализ многолетних сезонных изменений концентрации хлорофилла, максимальной скорости фотосинтеза фитопланктона и температуры воды в поверхностном слое глубоководной зоны Черного моря с 1998 по 2015 годы. Оценивались тренды указанных показателей. Для исследований использовались данные спутниковых наблюдений SeaWiFS и MODIS-Aqua, MODIS-Terra. Выявлены тенденции к повышению температуры на 4% по среднегодовым данным в глубоководной западной части моря за 18-тилетний период. Повышение происходило преимущественно за счет зимнего сезона. Понижение первичной продукции фитопланктона отмечено в пределах 16,4–18,6% от первоначального уровня по среднегодовым величинам при уровне значимости $p < 0,1$, по всей глубоководной области. Снижение первичной продукции наблюдалось летом. Статистически значимых направленных изменений концентрации хлорофилла по осредненным данным за 18 лет не отмечено. В различных частях глубоководной зоны направленность межгодовых и сезонных изменений всех показателей была сходной. Намечившаяся тенденция к снижению продуктивности фитопланктона за последние годы может привести к перестройке фитопланктонного сообщества.

Ключевые слова: многолетние тренды, сезонная изменчивость, температура воды, концентрация хлорофилла *a*, продуктивность фитопланктона, глобальное потепление, Черное море, спутниковые измерения

© I. V. Kovalyova^{1*}, Z. Z. Finenko¹, V. V. Suslin², 2022

¹A.O. Kovalevsky Institute of Biology of the Southern Seas of RAS, 299011, Nakhimov Pr, 2, Sevastopol, Russia

²Marine Hydrophysical Institute RAS, 299011, Kapitanskaya Str., 2, Sevastopol. Russia

*ila.82@mail.ru

TRENDS IN CHANGES IN PRIMARY PHYTOPLANKTON PRODUCTION ACCORDING TO REMOTE SENSING DATA IN THE DEEP-SEA REGION OF THE BLACK SEA FOR 1998–2015

Received 16.10.2021, Revised 30.06.2022, Accepted 16.09.2022

Abstract

The analysis of long-term seasonal changes in the concentration of chlorophyll, the maximum rate of phytoplankton photosynthesis and water temperature in the surface layer of the open waters Black Sea from 1998 to 2015 has been carried out. The trends of these indicators were assessed. For the research, we used the data of satellite observations SeaWiFS and MODIS-Aqua, MODIS-Terra. Typical positive temperature trends of 4% in the deep-water western part of the sea. An annual temperature rise in deep-water areas was noted in the western cyclonic circulation by 0.038 °C. According to average annual data in other areas, no increase was found. The increase was mainly due to the winter season. Negative trends of primary phytoplankton production within 16.4–18.6% of the initial level according to average annual values throughout the deep-water area. Significance level — $p < 0.1$. A decrease in primary production was observed in the summer. There were no statistically significant directional changes in

Ссылка для цитирования: Ковалёва И.В., Финенко З.З., Суслин В.В. Тренды изменения первичной продукции фитопланктона по данным дистанционного зондирования в глубоководной области Черного моря в 1998–2015 годы // Фундаментальная и прикладная гидрофизика. 2022. Т. 15, № 4. С. 42–53. doi:10.48612/fpg/dfbm-t6da-5rvb

For citation: Kovalyova I.V., Finenko Z.Z., Suslin V.V. Trends in Changes in Primary Phytoplankton Production According to Remote Sensing Data in the Deep-Sea Region of the Black Sea for 1998–2015. *Fundamental and Applied Hydrophysics*. 2022, 15, 4, 42–53. doi:10.48612/fpg/dfbm-t6da-5rvb

chlorophyll concentration based on averaged data over 18 years. In different parts of the deep-sea area, the direction of interannual and seasonal changes in all indicators was similar. The emerging trend towards a decrease in phytoplankton productivity in recent years may lead to a restructuring of the phytoplankton community.

Keywords: long-term trends, seasonal variability, water temperature, chlorophyll *a* concentration, phytoplankton productivity, global warming, Black Sea, satellite measurements

1. Введение

На фоне глобального потепления актуальны на сегодняшний день исследования долговременных изменений различных экологических показателей морских систем. Анализ временной динамики фитопланктона и температуры воды необходимы для оценки и прогнозирования экологического состояния морской среды. На сегодняшний день стали доступны регулярные спутниковые измерения оптических характеристик моря за длительные периоды на больших акваториях, позволяющие оценить концентрацию хлорофилла *a* и температуру воды, а также рассчитывать продуктивность и другие характеристики фитопланктона, благодаря которым можно наблюдать и объяснять процессы, протекающие в море. Показатели, на которых основана оценка первичной продукции — биомасса фитопланктона, концентрация хлорофилла, интенсивность освещения и температура воды — подвержены сезонным и межгодовым колебаниям. Температура влияет на скорость ассимиляции углерода, и ее повышение ведет к повышению первичной продукции. Кроме того, в естественной среде температура воды, как один из важных факторов, определяет стратификацию в водоеме и способствует образованию конвекционных потоков водных масс, приводящих к поступлению биогенных веществ в эвфотический слой. Эти процессы могут либо повышать продуктивность фитопланктона, либо понижать. Факторов, влияющих на первичную продукцию, много, и в рамках одного исследования их рассмотреть и проанализировать проблематично из-за обширности таких исследований. Поэтому в данной работе мы выбрали три показателя для того, чтобы провести совместную оценку их изменчивости в море. Прежде всего, это концентрация хлорофилла, как основная физиологическая характеристика фитопланктона. Отдельно изменчивость концентрации хлорофилла исследовалась многими авторами в различных частях моря [1–5], но параллельная оценка ее изменчивости с вариациями продуктивности фитопланктона проводилась значительно реже, в особенности на широких масштабах глубоководной области Черного моря. Также представляет интерес физический фактор — температура воды в поверхностном слое, существенность влияния глобального потепления на глубоководную часть Черного моря и первичную продукцию. Кроме долгопериодных тенденций в изменчивости температуры воды свыше 30-ти лет, возможны ее изменения и за более короткие временные интервалы [6], более выраженные, или имеющие противоположный характер по отношению к предыдущему периоду и в целом долгопериодной тенденции. Это может приводить к изменениям в экосистеме, как в исследуемый период, так и более долгосрочным. Поэтому целесообразно рассматривать характер изменчивости на коротких отрезках времени в несколько лет или за одно-два десятилетия, а также в отдельные сезоны.

Сезонная и многолетняя динамика первичной продукции отражает трофность и устойчивость экосистемы в целом. Многочисленные исследования посвящены сезонным и долговременным изменениям температуры воды и концентрации хлорофилла для отдельных акваторий [1–4], биомассы фитопланктона и ее сезонным изменениям [5, 7], а также исследованиям таксономического состава фитопланктонного сообщества [1, 5, 8]. Однако исследований многолетней сезонной динамики концентрации хлорофилла, температуры воды и первичной продукции одновременно с определением трендов указанных характеристик по всей акватории глубоководной части Черного моря за последние десятилетия по непрерывным данным не проводилось. В данном исследовании важно то, что рассматриваемые характеристики взяты из одной базы данных, и необходимые параметры рассчитываются по единому алгоритму, позволяющему проводить параллельное сравнение их изменений. А также возможность выявлять особенности связи среднегодовых показателей фитопланктона и в отдельные сезоны. В этом новизна проводимой работы.

Цель работы — оценить сезонные и многолетние тренды концентрации хлорофилла, температуры воды и продукции фитопланктона в глубоководных районах Черного моря за 18-летний период 1998–2015 гг.

2. Материалы и методы

Для расчетов и анализа межгодовых трендов были выделены районы в Черном море согласно гидрологическим особенностям: 1 — глубоководная часть, включающая западный циклональный круговорот; 2 — глубоководная часть, включающая восточный циклональный круговорот; 3 — район, включающий Батумский антициклон (рис. 1).

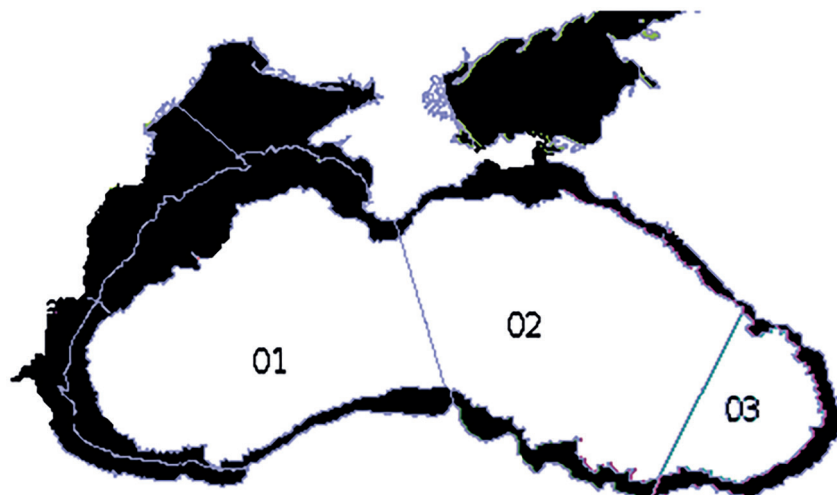


Рис. 1. Карта глубоководных районов в Черном море

Fig. 1. Map of deep-sea regions in the Black Sea

Осреднение по районам проводилось для центральной части моря на акваториях с глубиной больше 500 м в поверхностном слое. Ориентировочные границы крупномасштабных циркуляций принимались, как предложено в работе [9]. В исследованиях использовались спутниковые данные SeaWiFS\R2018.0\MLAC\ Level-2, MODIS-Aqua\R2018.0\LAC\Level-2 и MODIS-Terra\R2018.0\LAC\ Level-2¹. Пространственное разрешение данных составляет ~ 1 км в надири. Level-2 продукт обозначает данные второго уровня, которые включают время измерения, географическую привязку и ряд стандартных продуктов в физических единицах: спектр коэффициента яркости моря, R_{RS} в sr^{-1} ; концентрацию хлорофилла a , X_{L0} , в $mg\ m^{-3}$, рассчитанную на основе алгоритма, разработанного в Морском гидрофизическом институте (для SeaWiFS и MODIS) [10]. По результатам сравнения трех алгоритмов — стандартного NASA, Института океанологии им. П.П. Ширшова РАН и Морского гидрофизического института РАН (МГИ) — восстановления концентрации хлорофилла a по данным спутниковых измерений в видимом диапазоне спектра на основе доступных измерений *in situ* за период с 1997 по 2015 гг, продукт МГИ дает наименьшую относительную ошибку (~40%) [11]. Модель МГИ [10] позволяет лучше учитывать цветение диатомовых водорослей в весенний период. Используемые коэффициенты яркости моря на трех длинах волн 490, 510 и 555 нм для SeaWiFS и 488, 531 и 547 нм для MODIS учитывают изменение поглощения окрашенного растворенного вещества и слабо чувствительны к ошибкам атмосферной коррекции и обратному рассеянию света взвесью [10]. Таким образом, концентрация хлорофилла a , полученная с помощью этого регионального алгоритма, учитывает оптические свойства воды в верхнем слое моря в пределах первой оптической глубины.

Температура в поверхностном слое получена из спутниковых наблюдений для 1998–1999 гг. <http://podaac.jpl.nasa.gov/sst/>, для 2000–2015 гг — MODIS-Aqua/Terra, интенсивность ФАР в диапазоне 400–700 нм — <https://oceancolor.gsfc.nasa.gov/atbd/par/>. Измерения спутниковым сканером SeaWiFS проводились с 1998 по 2010 гг, с 2000 по 2015 гг. — приборами MODIS-Aqua и MODIS-Terra. Использовались спутниковые наблюдения, осредненные за двухнедельный период по ежесуточным данным за 18 лет до 2015 года, с наиболее точной, последней коррекцией на момент исследования. Для расчета продукции фитопланктона использовалась модель, описанная в работе [12].

Для фитопланктона, обитающего в поверхностном слое моря, P — чистая суточная продукция фитопланктона, $mg\ C\ m^{-3}\ сут^{-1}$ определялась как:

$$P = X_{L0} \cdot P_m \cdot th \left(\frac{\alpha^B \cdot E_0}{P_m} \right), \quad (1)$$

где X_{L0} — концентрация хлорофилла в поверхностном слое, $mg\ m^{-3}$; P_m — максимальная скорость фотосинтеза, нормированная на единицу хлорофилла, $mg\ C\ mg\ X_{L0}^{-1}\ сут^{-1}$; α^B — тангенс угла наклона кривой фотосинтез — свет, нормированный на концентрацию хлорофилла, $mg\ C\ mg\ X_{L0}^{-1}\ моль\ квантов^{-1}\ m^{-2}$; E_0 — фотосинтетически активная радиация (ФАР), $моль\ квантов\ m^{-2}\ сут^{-1}$.

¹ <https://oceancolor.gsfc.nasa.gov/>, <http://podaac.jpl.nasa.gov/sst/>

$P_m = \alpha^B \cdot E_k$, где E_k — начало светового насыщения фотосинтеза, (моль квантов $\text{м}^{-2} \text{сут}^{-1}$). По экспериментальным данным, полученным в поверхностном слое Черного моря для температуры 6,5–23 °C [13], E_k равно:

$$E_k = c \cdot \exp(b \cdot T) \cdot s \cdot DL, \quad (2)$$

где T — температура, °C; DL — продолжительность дня, ч; c и b — коэффициенты, полученные экспериментально; $c = 17,4$, $b = 0,066$. Для данного уравнения — $r^2 = 0,7$.

Тангенс угла наклона кривой фотосинтез — свет, нормированный на концентрацию хлорофилла, определяется:

$$\alpha^B = w \cdot (\text{Хл}_0^v) / s, \quad (3)$$

где коэффициенты w и v получены экспериментально: $w = 0,11$, $v = 0,29$. Коэффициент детерминации — $r^2 = 0,95$.

Статистическая обработка данных проводилась в пакетах программ Sigma Plot 12.5, Grapher, Excel. В качестве показателя статистической значимости тренда оценивался критерий Фишера при заданном уровне значимости. Так как осреднение проводилось на больших пространственных и временных масштабах и исследуемые параметры варьировали в широком диапазоне в различные сезоны, для выявления характерных тенденций нами принимался уровень значимости $\alpha = 0,1$.

3. Результаты

3.1. Многолетние тренды температуры воды в глубоководной части Черного моря

Влияние температуры на продукцию фитопланктона может быть как прямое, так и косвенное. Температура влияет на усиление или ослабление конвекционных потоков, которые контролируют продукцию и биомассу фитопланктона. Тенденции незначительного повышения температуры воды за 18 лет по всей акватории глубоководной части моря по регулярным двухнедельным данным были недостоверны. По осредненным данным для отдельных районов тренд повышения температуры отмечен при уровне значимости для района 1 — $p < 0,05$, для района 2 и 3 — недостоверен (рис. 2). Таким образом, по среднегодовым значениям наблюдался слабый положительный тренд — 4 % — за весь рассматриваемый период только в акватории, включающей западный циклонический круговорот (рис. 2). Наибольшие изменения температуры имели место зимой и весной. Возрастание температуры в 1 и 3 регионах зимой было статистически значимым за 18-тилетний период ($p < 0,05$), а во втором — при $p < 0,1$. Весной повышение наблюдалось при уровне значимости $p < 0,1$ в 1-м и 2-м районах, в Батумском антициклоническом круговороте тренд был недостоверен (рис. 3). Осенью и летом статистически значимые тренды отсутствовали. Полученные тренды нестабильны и проявляются лишь в отдельные сезоны, поэтому говорить о характерной тенденции потепления воды в поверхностном слое моря нельзя. Только в районе западного циклонического круговорота наблюдалось наиболее заметное повышение температуры ежегодно приблизительно — на 0,038 °C. При этом более высокая средняя температура отмечена в восточной части моря.

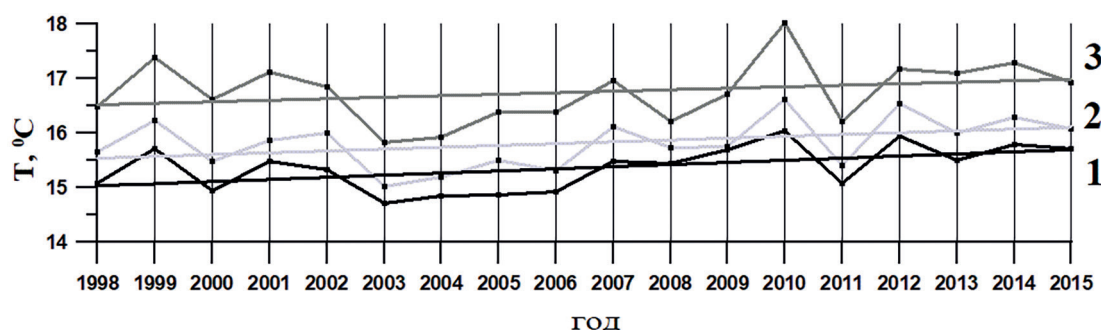


Рис. 2. Тренды среднегодовых значений температуры воды в поверхностном слое в глубоководных районах Черного моря

Fig. 2. Trends of mean annual values of water temperature in the surface layer in the deep-water regions of the Black Sea

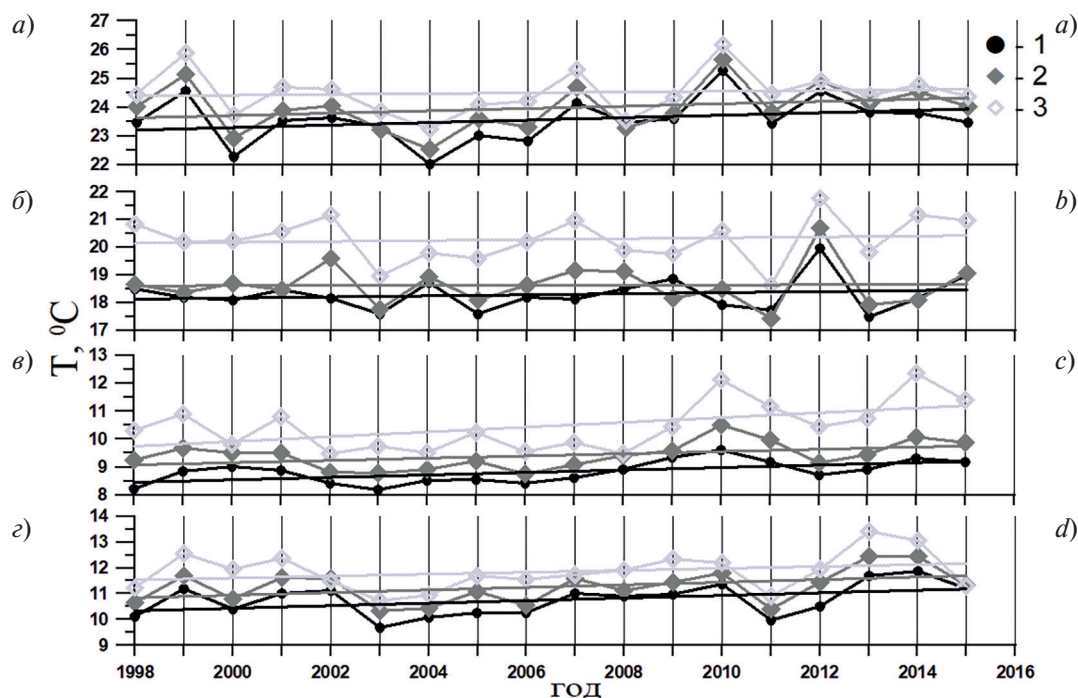


Рис. 3. Тренды сезонных изменений температуры воды в поверхностном слое в глубоководной области Черного моря в районах: 1 — •, 2 — ♦, 3 — ◇; а — летом, б — осенью, в — зимой, г — весной

Fig. 3. Trends of seasonal changes in water temperature in the surface layer in the deep-water area of the Black Sea in the areas: 1 — •, 2 — ♦, 3 — ◇; а — in summer, б — in autumn, в — in winter, г — in spring

3.2. Многолетние тренды концентрации хлорофилла в глубоководной части Черного моря

В глубоководных районах (рис. 1) характер среднегодовых изменений концентрации хлорофилла был идентичен. За 18-летний период можно отметить тенденцию к снижению концентрации хлорофилла (рис. 4), однако статистически значимых трендов по среднегодовым данным обнаружено не было. Годы с высокой концентрацией хлорофилла — 1998, 2000, 2003, 2004 — оказали существенное влияние на повышение этого показателя в первой половине исследуемого периода. Повышения происходили также в 2009, 2011 гг. Заметное снижение хлорофилла произошло после 2012 г. с минимальными значениями в 2013 г. Как видно (рис. 4), периоды увеличения среднегодовых значений концентрации хлорофилла сменяются периодами снижения. Среднегодовые величины за 18 лет для трех районов составили $0,63 \pm 0,07 \text{ мг м}^{-3}$, $0,62 \pm 0,05 \text{ мг м}^{-3}$, $0,61 \pm 0,06 \text{ мг м}^{-3}$ соответственно.

Сезонные изменения во всех районах происходили сходным образом (рис. 5). По двухнедельным регулярным многолетним наблюдениям концентрация хлорофилла достоверно снижалась в летний сезон. Статистически значимые тренды по оценкам критерия Фишера были получены для трех районов при уровне значимости $p < 0,001$. Весной в указанных районах отмечен слабый отрицательный тренд при уровне значимости $p < 0,03$, осенью и зимой тренд не наблюдался по всей глубоководной части моря.

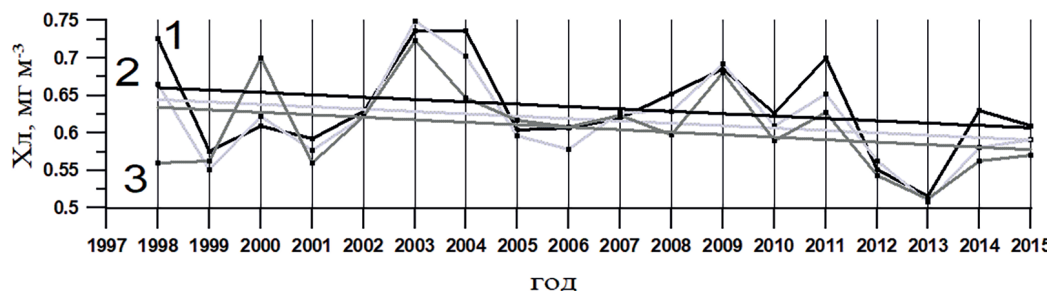


Рис. 4. Тренды среднегодовых значений концентрации хлорофилла в глубоководных районах Черного моря

Fig. 4. Trends in the average annual values of chlorophyll concentration in the deep-water regions of the Black Sea

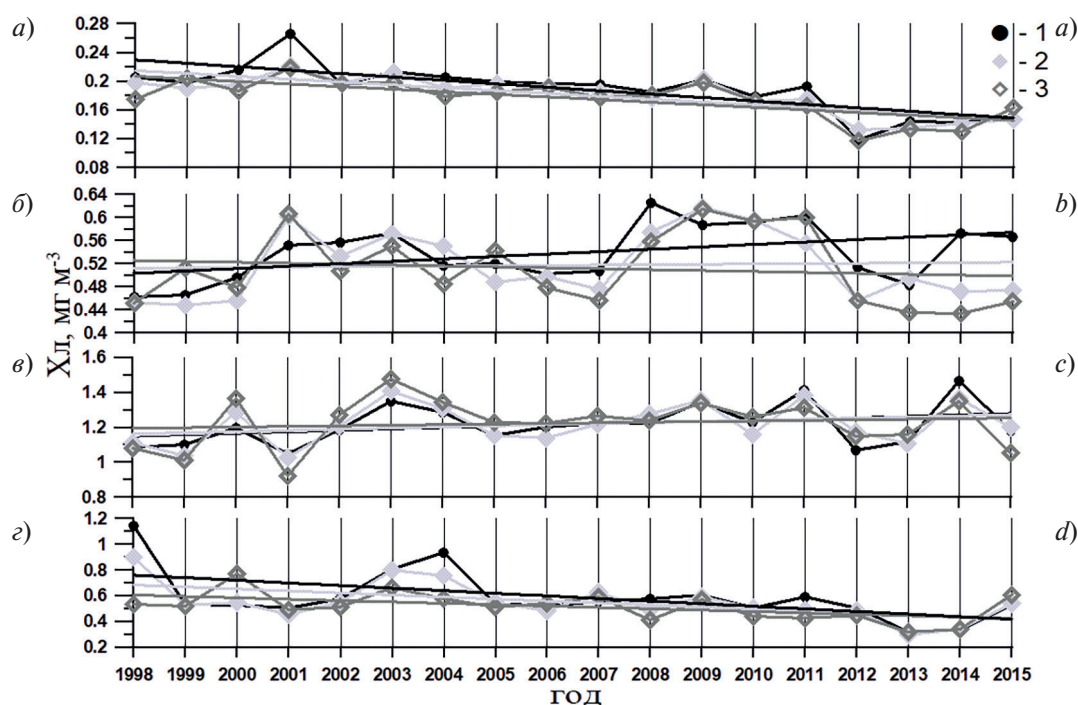


Рис. 5. Тренды сезонных изменений концентрации хлорофилла в глубоководной области Черного моря, в районах: 1 — •, 2 — ♦, 3 — ♦; а — летом; б — осенью; в — зимой; г — весной

Fig. 5. Trends of seasonal changes in chlorophyll concentration in the deep-water area of the Black Sea, in areas: 1 — •, 2 — ♦, 3 — ♦; а — in summer; б — in autumn; в — in winter; г — in spring

Таблица
Table

Среднесезонные значения концентрации хлорофилла для трех районов за 18 лет, $\langle X_l \rangle$, mg m^{-3}
Average seasonal values of chlorophyll concentration for three districts over 18 years, $\langle \text{Chl} \rangle$, mg m^{-3}

Сезон	Район 1	Район 2	Район 3
Лето	$0,18 \pm 0,04$	$0,18 \pm 0,04$	$0,17 \pm 0,04$
Осень	$0,53 \pm 0,29$	$0,52 \pm 0,28$	$0,51 \pm 0,28$
Зима	$1,22 \pm 0,26$	$1,22 \pm 0,27$	$1,22 \pm 0,30$
Весна	$0,59 \pm 0,44$	$0,55 \pm 0,39$	$0,52 \pm 0,35$

Однако во второй половине исследуемого периода осенью и зимой по не осредненным двухнедельным данным, а также среднесезонным за 18 лет отмечено повышение вариабельности величин. Высокая вариабельность величин наблюдалась и в конце 1990-х — начале 2000-х гг, как по осредненным, так и по неосредненным данным в течение большинства сезонов.

3.3. Многолетние тренды первичной продукции фитопланктона в глубоководной части Черного моря

Характер изменения среднегодовых значений первичной продукции в трех глубоководных районах был одинаковым и сходным с изменением концентрации хлорофилла (рис. 6). Средняя многолетняя продукция варьировала в узких пределах — $24,6\text{--}5,4 \text{ мгС сут}^{-1} \text{ м}^{-3}$ в поверхностном слое (0–1 м) моря. В течение года наиболее высокие значения наблюдались в зимний период (в среднем $34\text{--}38 \text{ мгС сут}^{-1} \text{ м}^{-3}$), минимальные — летом ($16\text{--}17 \text{ мгС сут}^{-1} \text{ м}^{-3}$). Весной и осенью среднесезонные значения находились приблизительно на одном уровне ($23\text{--}25 \text{ мгС сут}^{-1} \text{ м}^{-3}$) в трех районах. Однако вариабельность величин в весенний период в различные годы была выше (от 11 до $56 \text{ мгС сут}^{-1} \text{ м}^{-3}$), чем осенью, что, вероятно, связано с периодом установления стратификации в столбе воды. По всей глубоководной зоне в зимний период с 1998 по 2015 гг. наблюдался слабый положительный тренд первичной продукции (для 1 и 3 районов при уровне значимости

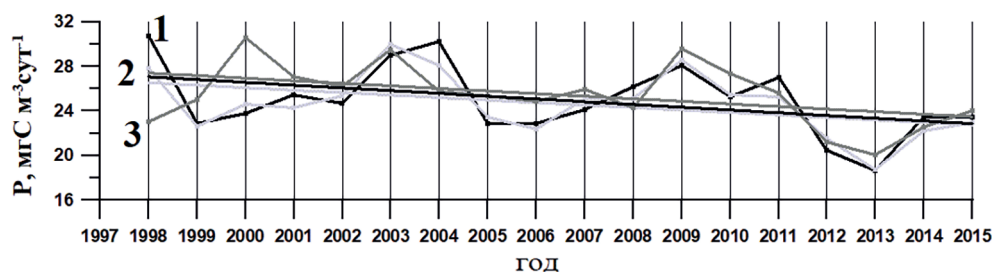


Рис. 6. Тренды среднегодовых значений продукции фитопланктона в глубоководных районах Черного моря

Fig. 6. Trends in the average annual values of phytoplankton production in the deep-water regions of the Black Sea

$p < 0,05$, для района 2 при $p < 0,1$). Осенью слабый положительный наклон отмечен в районах 2 и 3 при $p < 0,1$, тогда как в районе 1 он отсутствовал. Отрицательный тренд летом отмечен при уровне значимости $p < 0,001$ для районов 1, 2, и для района 3 — $p < 0,005$, а весной для 2 и 3 зон статистически значимое снижение продуктивности наблюдалось при $p < 0,01$, для зоны 1 — $p < 0,02$ (рис. 7).

Понижение первичной продукции летом и весной привело к общему снижению по среднегодовым данным за 18-тилетний период. По всей глубоководной зоне наблюдался отрицательный тренд в пределах 16,4–18,6% (рис. 6) по оценкам критерия Фишера при уровне значимости $p < 0,1$. Отдельные повышения среднегодовых значений происходили в 1998, 2000, 2003, 2004, 2009 гг. аналогично изменениям концентрации хлорофилла. Продукция фитопланктона является производной величиной концентрации хлорофилла, что приводит к схожести динамики двух показателей. Однако наклон трендов продукции был более выражен, в отличие от концентрации хлорофилла. Стоит отметить, что по не осредненным регулярным двухнедельным измерениям первичной продукции также наблюдался отрицательный наклон для 1-го и 2-го районов при уровне значимости $p < 0,05$ и $0,06$ соответственно. В третьем он отсутствовал. Осреднение данных, с одной стороны, снижает точность, с другой стороны, уменьшает вариабельность исследуемых показателей и позволяет выявить общие тенденции.

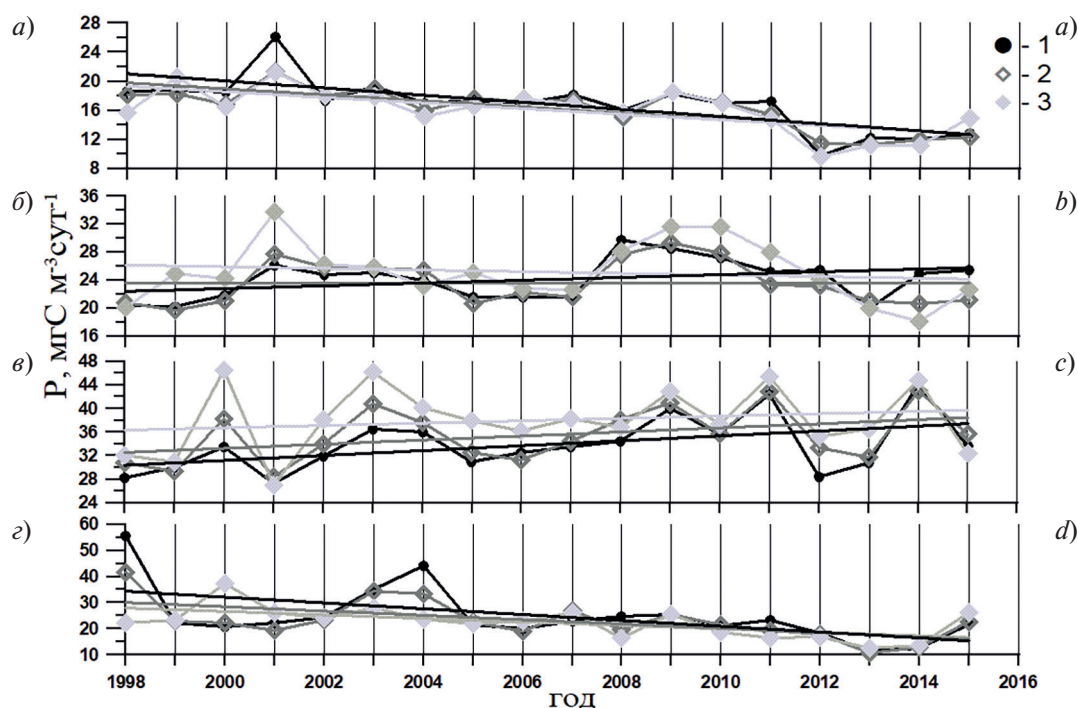


Рис. 7. Тренды сезонных изменений продукции фитопланктона в глубоководной области Черного моря в районах: 1 — •, 2 — ♦, 3 — ◊; а — летом, б — осенью, в — зимой, г — весной

Fig. 7. Trends of seasonal changes in phytoplankton production in the deep-water area of the Black Sea in the following areas: 1 — •, 2 — ♦, 3 — ◊; а — in summer, б — in autumn, в — in winter, г — in spring

Таким образом, в центральной части моря наблюдался отрицательный тренд среднегодовой продукции фитопланктона, обусловленный преимущественно снижением в летний и весенний периоды, тогда как по концентрации хлорофилла статистически значимое снижение отсутствовало. Достоверный отрицательный наклон для концентрации хлорофилла и первичной продукции отмечен в летний период. При этом, тренд температуры воды в поверхностном слое по всей глубоководной части Черного моря не был выражен и наблюдался только в западном районе по среднегодовым данным. Статистически значимое повышение температуры отмечено лишь в холодный сезон по всей рассматриваемой акватории. Потепление воды в зимний период могло снизить перемешивание верхнего и глубинного слоев, и, соответственно, уменьшить поступление биогенных веществ в зону фотосинтеза, а также привести к более раннему установлению стратификации в столбе воды. Указанные причины могут сократить продолжительность цветения водорослей в холодный сезон и повлиять на снижение продуктивности в летний период.

4. Обсуждение

Большое количество работ посвящено исследованию термического состояния вод Черного моря [6, 14, 15]. За длительный временной интервал, около ста лет, наблюдалась циклическая смена холодных и теплых десятилетий без явно выраженного тренда [6, 14]. В то же время, многими авторами отмечен характерный положительный тренд за последние 50 и в особенности 30 лет [6, 14, 16], как в поверхностном, так и в глубинном слоях моря. Для черноморского бассейна с 1950-х по 2010-е гг. за различные временные отрезки даны разные вариации температурного тренда [14, 16–19]. В то время как в 1980-х — начале 1990-х отмечалось некоторое снижение, в особенности зимних температур [14, 18, 20] и слабый отрицательный тренд, в дальнейшем, с 1994 по 2010 гг. исследования температурного режима по данным спутниковых наблюдений и прямых измерений указывали на незначительное потепление воды [14, 17, 18, 20]. В других внутренних морях также наблюдается потепление [15, 21]. Например, в Балтийском море с 1990 по 2008 гг. температура поверхности моря возрастала на 0,03–0,08 °C в год [22, 23, 24]. По нашим данным за 18 лет прирост температуры воды в Черном море с 1998 по 2015 годы в глубоководной зоне различался в отдельных районах. Так, в западной глубоководной части моря повышение было более выражено и составляло 0,038 °C в год, тогда как в других глубоководных районах оно не значимо статистически. То есть, нельзя сказать о явной тенденции к потеплению воды в поверхностном слое центральной части моря. Эти выводы согласуются с данными, приведенными другими авторами [25] для 1960–2015 гг. Результаты моделирования [25] показали, что температура поверхности не проявляет четкой линейной тенденции, в то время как в промежуточном холодном слое характерна слабая положительная тенденция. Отметим, что по нашим данным повышение температуры воды в исследуемые годы наблюдалось в холодный сезон.

При этом, на отдельных акваториях прибрежных районов может отмечаться прирост среднегодовой температуры за более длительные временные интервалы и последние два десятилетия [26]. Это подчеркивает важность выделения различных районов для исследования процессов, протекающих в море, и отдельного анализа прибрежных и глубоководных зон. В данной работе проводился анализ температуры воды главным образом для оценки первичной продукции фитопланктона. По многолетним наблюдениям среднегодовых величин концентрации хлорофилла и первичной продукции в центральной части Черного моря выявлено достоверное снижение только продукции за 18 лет. По расчетным данным величин концентрации хлорофилла в поверхностном слое, полученным по модели МГИ [11], при тенденции к снижению показателя в летний период статистически значимых трендов по среднегодовым данным обнаружено не было. Первичная продукция отражает новообразование органического вещества. Соотношение концентрации хлорофилла к органическому углероду в клетке может различаться от влияния внешних факторов. Поэтому важно оценивать эти показатели в отдельности и проводить их сопоставление. Можно предположить, что в рассмотренных случаях повышение температуры в зимний период стало следствием ослабления конвекционных потоков из глубинных слоев моря через холодный промежуточный слой и соответственно, меньшего поступления питательных веществ в зону фотосинтеза. Обменные процессы в водных массах зимой создают питательный ресурс для развития фитопланктона в течение года, что отражается на его годовом цикле [1, 5]. В теплый сезон устанавливается стратификация в столбе воды и обмен водных масс минимален. Развитие фитопланктона может осуществляться за счет оставшегося ресурса и регенерационной продукции. В исследованиях сезонной и многолетней изменчивости фитопланктона и закономерностей развития кокколитофорид в 2002–2017 гг. [5] также отмечено снижение «цветения» водорослей летом в годы с теплыми зимами. Подчеркивалась важность температуры воды в холодный период, которая отражалась не только на летнем «цветении», но и зимнем развитии

кокколитофорид [5], вместо характерных для этого сезона диатомовых водорослей. Полученные нами результаты по первичной продукции, подтверждают указанное, и отражают общий годовой ход развития фитопланктона с 1998 по 2015 гг. и характерные сезонные тенденции. Слабое повышение скорости новообразования органического вещества отмечалось зимой, понижение весной и летом. За 18-летний период происходит снижение продукции фитопланктона в теплый сезон и это отражается на среднегодовой величине. В более ранний и длительный период с 1948 до 2000 гг. по прямым измерениям трендов биомассы и первичной продукции не наблюдалось [7, 20]. Отметим, что зимой в исследуемые нами годы происходило слабое повышение продукции фитопланктона на фоне нестабильного повышения температуры в отдельных частях глубоководной зоны Черного моря и это может быть связано не только с температурой, но и сменой видового состава [1, 5]. В других морях наблюдается рост всех характеристик [21, 27]. Причины зимнего «цветения» в ряде морей в глубоководных районах схожи с черноморскими [21, 27]. Однако существуют региональные особенности и различные факторы, влияющие на первичную продукцию и развитие фитопланктона. Перемешивание водных масс определяется кроме температуры воды соленостью и ветровым воздействием, которое усиливает турбулентность, а также способствует обмену вод прибрежных и глубоководных районов. По метеорологическим данным вблизи прибрежной метеостанции г. Геленджика отмечено ослабление ветровой активности последние десятилетия, что ведет к уменьшению дрейфовых течений, в том числе потеплению [26]. Это может вносить вклад в обменные процессы водных масс и отражаться на первичной продукции фитопланктона. Из проведенного анализа следует, что процесс глобального потепления, на данном этапе слабо затронул продуктивность фитопланктона и экосистему Черного моря. Однако наметившиеся тенденции могут повлечь к более заметным изменениям.

5. Выводы

Таким образом, в глубоководной зоне Черного моря среднегодовое повышение температуры различалось в отдельных районах: 1) в западном циклональном круговороте — на $0,038\text{ }^{\circ}\text{C}$; или на 4% за 18-летний период; 2) в восточном циклональном круговороте и Батумском антициклоне статистически значимого повышения по среднегодовым данным выявить не удалось. По среднесезонным данным выявлен положительный тренд температуры зимой во всех трех районах. Статистически значимых трендов концентрации хлорофилла не выявлено, хотя в летний сезон наблюдалась тенденция к снижению. Средняя многолетняя продукция варьировала в трех районах в пределах $24,6 \pm 2,8$ – $25,4 \pm 3,2\text{ мгС сут}^{-1}\text{ м}^{-3}$ в поверхностном слое моря. Отмечен слабый отрицательный тренд первичной продукции в глубоководной части моря и в антициклональном круговороте близ Батуми, преимущественно за счет теплого периода. Это может быть результатом снижения обменных процессов водных масс в глубоководной области из-за участвовавших теплых зим. Описанные процессы могут указывать на слабую тенденцию к общему снижению продукции фитопланктона в последние годы в Черном море. На данном этапе это не повлияло существенно на экосистему, но в дальнейшем может привести к перестройке фитопланктонного сообщества и снижению рыбных запасов.

Финансирование

Работа выполнена в рамках государственного задания ФИЦ ИнБЮМ по теме «Функциональные, метаболические и токсикологические аспекты существования гидробионтов и их популяций в биотопах с различным физико-химическим режимом» (№ гос. регистрации 121041400077–1) и частично в рамках государственного задания по теме № 0827–2018–0002 «Развитие методов оперативной океанологии на основе междисциплинарных исследований процессов формирования и эволюции морской среды и математического моделирования с привлечением данных дистанционных и контактных измерений».

Funding

The work was carried out within the framework of the state assignment of the Federal Research Center IBSS on the topic “Functional, metabolic and toxicological aspects of the existence of aquatic organisms and their populations in biotopes with different physicochemical regimes” (state registration number 121041400077–1). The study was carried out partly within the framework of the state task on theme (0827–2018–0002) “Development of methods of operational oceanology based on interdisciplinary research of the processes of construction and evolution of the marine environment and mathematical modeling using data from remote and in situ measurements”.

Литература

1. Микаэлян А.С. Временная динамика фитопланктона глубоководного бассейна Черного моря: Дис... докт. биол. Наук. М., 2018. 266 с.
2. Финенко З.З., Мансурова И.М., Суслин В.В. Динамика концентрации хлорофилла *a* в Чёрном море по спутниковым измерениям // Морской биологический журнал. 2019. Т. 4, № 2. С. 87–95. doi:10.21072/mbj.2019.04.2.09
3. Finenko Z.Z., Suslin V.V., Kovaleva I.V. Сезонные и многолетние изменения концентрации хлорофилла в Черном море по спутниковым наблюдениям // Океанология. 2014. Vol. 54. № 5. P. 635–645. doi:10.7868/S0030157414050062
4. Kopelevich O.V., Sheberstov S.V., Yunev O., Basturk O., Finenko Z.Z., Nikonov S., Vedernikov V.I. Surface chlorophyll in the Black Sea over 1978–1986 derived from satellite and in situ data // Journal of Marine Systems. 2002. V. 36 Issue 3–4 P. 145–160. doi:10.1016/S0924–7963(02)00184–7
5. Востоков С.В., Лобковский Л.И., Востокова А.С., Соловьев Д.М. Сезонная и многолетняя изменчивость фитопланктона в Чёрном море по данным дистанционного зондирования и контактными измерениями хлорофилла *a* // Доклады академии наук. 2019. Т. 485, № 1. С. 99–103. doi:10.31857/S0869–5652485199–103
6. Oguz T., Dippner J.W., Kaymaz Z. Climatic regulation of the Black Sea hydro-meteorological and ecological properties at interannual-to-decadal time scales // Journal of Marine Systems. 2006. V. 60, P. 235–254. doi:10.1016/j.jmarsys.2005.11.011
7. Кривенко О.В., Пархоменко А.В., Чурилова Т.Я., Финенко З.З., Суслин В.В. Реанализ долговременных рядов изменения биомассы фитопланктона в открытой части Чёрного моря по результатам натурных и спутниковых наблюдений // Экологическая безопасность прибрежной и шельфовой зон и комплексное исследование ресурсов шельфа. Севастополь: 2012. Т. 2. № 26. С. 185–194.
8. Mikaelyan A.S., Mosharova S.A., Kubryakov A.A., Pautova L.A., Fedorova A., Chasovnikova V.K. The impact of physical processes on taxonomic composition, distribution and growth of phytoplankton in the open Black Sea // Journal of Marine Systems. 2020. Vol. 208. (103368) P. 1–16. doi.org/10.1016/j.jmarsys.2020.103368
9. Иванов В.А., Белокопытов В.Н. Океанография Черного моря. Севастополь: НАН Украины, Морской гидрофизический институт. 2011. 212 с.
10. Suslin V.V., Churilova T. Ya. Regional algorithm for separating light absorption by chlorophyll-*a* and colored detrital matter in the Black Sea, using 480–560 nm bands from ocean color scanners // International Journal of Remote Sensing. 2016. V. 37, N 18. P. 4380–4400. doi:10.1080/01431161.2016.1211350
11. Суслин В.В., Чурилова Т.Я., Ли М.Е. Мончева С., Финенко З.З. Концентрация хлорофилла *a* в Черном море: Сравнение спутниковых алгоритмов // Фундаментальная и прикладная гидрофизика. 2018. Т. 11, № 3. С. 64–72. doi:10.7868/S2073667318030085
12. Финенко З.З., Ковалева И.В., Суслин В.В. Использование спутниковых данных для оценки удельной скорости роста фитопланктона в поверхностном слое Черного моря // Биология моря. 2019. Т. 45, № 5. С. 334–341. doi:10.1134/S0134347519050115
13. Финенко З.З., Чурилова Т.Я., Сосик Х.М., Бастюрк О. Изменчивость фотосинтетических параметров фитопланктона в поверхностном слое черного моря // Океанология. 2002. Т. 42, № 1. С. 60–75.
14. Белокопытов В.Н. О климатической изменчивости термохалинной структуры Черного моря // Экологическая безопасность прибрежной и шельфовой зон и комплексные исследования ресурсов шельфа. 2013. Т. 7. С. 226–230.
15. Levitus S., Antonov J.I., Boyer T.P., Baranova O.K., Garcia H.E., Locarnini R.A., Mishonov A.V., Reagan J.R., Seidov D., Yarosh E.S., Zweng M.M. World Ocean heat content and thermocline sea level change (0–2000 m), 1955–2010 // Geophysical Research Letters. 2012. Vol. 39. L10603. doi:10.1029/2012GL051106
16. Kazmin A.S., Zatsepin A.G. Long-term variability of surface temperature in the Black Sea, and its connection with the large-scale atmospheric forcing // Journal of Marine Systems. 2007. V. 68, № 1. P. 293–301.
17. Полонский А.Б., Шокурова И.Г., Белокопытов В.Н. Десятилетняя изменчивость температуры и солености в Черном море // Морской гидрофизический журнал. 2013. Т. 6. С. 27–41.
18. Ginzburg A.I., Kostianoy A.G., Sheremet N.A. Sea Surface Temperature Variability / The Black Sea Environment. The Handbook of Environmental Chemistry. Berlin Heidelberg. Springer-Verlag. Part Q, Vol. 5. 2008. P. 255–275.
19. Kara A.B., Barron C.N., Wallcraft A.J., Oguz T., Casey K.S. Advantages of fine resolution SSTs for small ocean basins: Evaluation in the Black Sea // Journal of Geophysical Research. 2008. Vol. 113, C08013.
20. Ковалёва И.В. Межгодовые и сезонные изменения концентрации хлорофилла *a* и первичной продукции в глубоководной части Черного моря // Гидробиологический журнал. 2014. Т. 50, № 3. С. 38–50.
21. Зуенко Ю.И., Перишина Е.А. Изменчивость температуры воды и сроков весеннего «цветения» на нерестилищах сардины иваси в Японском море // Известия ТИНРО. 2011, Т. 165. С. 251–264.
22. Lehmann A., Getzlaff K., Harlab J. Detailed assessment of climate variability in the Baltic Sea area for the period 1958 to 2009 // Climate Research. 2011. V. 46. P. 186–195. doi:10.3354/cr00876

23. Кудрявцева Е.А. Роль геоэкологических факторов в распределении первичной продукции российского сектора Гданьского бассейна Балтийского моря: Дис ... канд. геогр. наук. Калининград, 2017. 159 с.
24. Voss R., Petereit C., Schmidt J.O., Lehmann A., Makarchouk A., Hinrichsen H.H. The spatial dimension of climate-driven temperature change in the Baltic Sea and its implication for cod and sprat early life stage survival // *Journal of Marine Systems*. 2012. Vol. 100–101. P. 1–8. doi:10.1016/j.jmarsys.2012.03.009
25. Miladinova S.A., Stips E., Garcia-Gorritz D., Macias Moy. Black Sea thermohaline properties: Long-term trends and variations // *Journal of Geophysical Research: Oceans*. 2017. Vol. 122. P. 5624–5644. doi:10.1002/2016JC012644
26. Мельников В.А., Москаленко Л.В., Кузеванова Н.И. Ветровые циклы и климатические тренды Черного моря / под ред. Кабатченко И.М. // Труды ГОИН имени Н.Н. Зубова. Исследования океанов и морей. 2018. Вып. 219. С. 101–123.
27. Буканова Т.В. Тенденции эвтрофирования юго-восточной части Балтийского моря по спутниковым данным: Дис. ...канд. геогр. наук. Калининград. 2014. 142 с.

References

1. Mikaelyan A.S. Time dynamics of phytoplankton in the deep-water basin of the Black Sea: Diss. ...Doct. Biol. Sci. Moscow. 2018, 266 p. (In Russian).
2. Finenko Z.Z., Mansurova I.M., Suslin V.V. Dynamics of chlorophyll a concentration in the Black Sea on satellite data. *Marine Biological Journal*. 2019, 4, 2, 87–95 (in Russian). doi:10.21072/mbj.2019.04.2.09
3. Finenko Z.Z., Suslin V.V., Kovaleva I.V. Seasonal and long-term dynamics of the chlorophyll concentration in the Black Sea according to satellite observations. *Oceanology*. 2014, 54, 5, 596–605. doi:10.1134/S0001437014050063
4. Kopelevich O.V., Sheberstov S.V., Yunev O., Basturk O., Finenko Z.Z., Nikonov S., Vedernikov V.I. Surface chlorophyll in the Black Sea over 1978–1986 derived from satellite and in situ data. *Journal of Marine Systems*. 2002, 36, 3–4, 145–160. doi:10.1016/S0924–7963(02)00184–7
5. Vostokov S.V., Lobkovskii L.I., Vostokova A.S., Solov'ev D.M. Seasonal and interannual variability of phytoplankton in the Black Sea on the basis of remote sensing data and in situ measurements of chlorophyll-a. *Doklady Earth Sciences*. 2019, 485, 1, 293–297. doi:10.1134/S1028334X19030097
6. Oguz T., Dippner J.W., Kaymaz Z. Climatic regulation of the Black Sea hydro-meteorological and ecological properties at interannual-to-decadal time scales. *Journal of Marine Systems*. 2006, 60, 235–254. doi:10.1016/j.jmarsys.2005.11.011
7. Krivenko O.V., Parhomenko A.V., Churilova T. Ya., Finenko Z.Z., Suslin V.V. Reanalysis of long-term series of changes in phytoplankton biomass in the open part of the Black Sea based on the results of field and satellite observations. *Ekologicheskaya Bezopasnost' Pribrezhnoi i Shelfovoi Zon i Kompleksnye Issledovaniya Resursov Shelfa*. 2012, 2, 26, 185–194 (in Russian).
8. Mikaelyan A.S., Mosharova S.A., Kubryakov A.A., Pautova L.A., Fedorova A., Chasovnikova V.K. The impact of physical processes on taxonomic composition, distribution and growth of phytoplankton in the open Black Sea. *Journal of Marine Systems*. 2020, 208, 103368, 1–16. doi:10.1016/j.jmarsys.2020.103368
9. Ivanov V.A., Belokopytov V.N. Oceanography of the Black Sea. *NAS of Ukraine, Marine Hydrophysical Institute, Sevastopol*, 2011, 209 p. (In Russian).
10. Suslin V.V., Churilova T. Ya. Regional algorithm for separating light absorption by chlorophyll-a and coloured detrital matter in the Black Sea, using 480–560 nm bands from ocean colour scanners. *International Journal of Remote Sensing*. 2016, 37, 18, 4380–4400. doi:10.1080/01431161.2016.1211350
11. Suslin V.V., Churilova T. Ya., Lee M., Moncheva S., Finenko Z.Z. Comparison of the Black Sea chlorophyll-a algorithms for SeaWiFS and MODIS instruments. *Fundamental and Applied Hydrophysics*. 2018, 11, 3, 64–72 (in Russian). doi:10.7868/S2073667318030085
12. Finenko Z.Z., Kovalyova I.V., Suslin V.V. Use of satellite data for the estimation of the specific growth rate of phytoplankton in the surface layer of the Black Sea. *Russian Journal of Marine Biology*. 2019, 45, 4, 313–319. doi:10.1134/S1063074019040059
13. Finenko Z.Z., Churilova T. Ya., Sosik H.M., Bastruk O. Variability of photosynthetic parameters of the surface phytoplankton in the Black Sea. *Oceanology*. 2002, 1, 42, 53–67.
14. Belokopytov V.N. On the climatic variability of the Black Sea thermohaline structure. — *Ekologicheskaya bezopasnost' pribrezhnoi i shelfovoi zon i kompleksnye issledovaniya resursov shelfa*. 2013, 27, 226–230 (In Russian).
15. Levitus S., Antonov J.I., Boyer T.P., Baranova O.K., Garcia H.E., Locarnini R.A., Mishonov A.V., Reagan J.R., Seidov D., Yarosh E.S., Zweng M.M. World Ocean heat content and thermosteric sea level change (0–2000 m), 1955–2010. *Geophysical Research Letters*. 2012, 39, L10603. doi:10.1029/2012GL051106
16. Kazmin A.S., Zatsepin A.G. Long-term variability of surface temperature in the Black Sea, and its connection with the large-scale atmospheric forcing. *Journal of Marine Systems*. 2007, 68, 1, 293–301.

17. Polonskii A.B., Shokurova I.G., Belokopytov V.N. Ten-year variability of temperature and salinity in the Black Sea. *Physical Oceanography*. 2013, 6, 27–41 (in Russian).
18. Ginzburg A.I., Kostianoy A.G., Sheremet N.A. Sea Surface Temperature Variability. The Black Sea Environment. The Handbook of Environmental Chemistry. *Berlin Heidelberg: Springer-Verlag*. V. 5, Part Q. 2018, 255–275.
19. Kara A.B., Barron C.N., Wallcraft A.J., Oguz T., Casey K.S. Advantages of fine resolution SSTs for small ocean basins: Evaluation in the Black Sea. *Journal of Geophysical Research*. 2008, 113, C08013.
20. Kovaleva I.V. Interannual and seasonal changes in the concentration of chlorophyll α and primary production in the deepwater section of the Black Sea. *Hydrobiological Journal*. 2014, 50, 5, 35–46. doi:10.1615/HydrobJ.v50.i5.40
21. Zuenko Yu.I., Pershina E.A. Variability of water temperature and the timing of spring “bloom” in the spawning grounds of Iwashi sardine in the Sea of Japan. *Izvestiya TINRO*. 2011, 165, 251–264 (in Russian).
22. Lehmann A., Getzlaff K., Harlab J. Detailed assessment of climate variability in the Baltic Sea area for the period 1958 to 2009. *Climate Research*. 2011, 46, 186–195.
23. Kudryavtzeva E.A. The role of geoecological factors in the distribution of primary production in the Russian sector of the Gdansk basin of the Baltic sea: Diss. ...Cand. Geogr. Sci. Kaliningrad. 2017, 159 p. (in Russian).
24. Voss R., Petereit C., Schmidt J.O., Lehmann A., Makarchouk A., Hinrichsen H.H. The spatial dimension of climate-driven temperature change in the Baltic Sea and its implication for cod and sprat early life stage survival. *Journal of Marine Systems*. 2012, 100–101, 1–8.
25. Miladinova S.A., Stips E., Garcia-Gorriiz D., Macias Moy. Black Sea thermohaline properties: Long-term trends and variations. *Journal of Geophysical Research: Oceans*. 2017, 122, 5624–5644. doi:10.1002/2016JC012644
26. Melnikov V.A., Moskalenko L.V., Kuzevanova N.I. Black Sea wind cycles and climatic trends / ed. Kabatchenko I.M. *Proceedings of N.N. Zubov State Oceanographic Institute. Ocean and Sea Research*. 2018, 219, 101–123 (in Russian).
27. Bukanova T.V. Trends in eutrophication of the southeastern Baltic Sea based on satellite data: Diss. ...Cand. Geogr. Sci. Kaliningrad. 2014, 142 p. (in Russian).

Об авторах

КОВАЛЁВА Илона Васильевна, РИНЦ AuthorID: 1039761, ORCID: 0000-0001-5430-2002,
Scopus AuthorID: 56405274600, WoS ResearcherID: AAB-4397-2019, e-mail: ila.82@mail.ru

ФИНЕНКО Зосим Зосимович, РИНЦ AuthorID: 744590, ORCID: 0000-0003-4852-341X,
Scopus AuthorID: 6603566261, WoS ResearcherID: B-7041-2018, e-mail: zosim_finenko@mail.ru

СУСЛИН Вячеслав Владимирович, РИНЦ AuthorID: 825673, ORCID: 0000-0002-8627-7603,
Scopus AuthorID: 6602501867, e-mail: slava.suslin@mhi-ras.ru