

Тренды многолетних изменений концентрации хлорофилла, первичной продукции фитопланктона и температуры воды на шельфе в южном и восточном районах Чёрного моря

И. В. Ковалёва¹, З. З. Финенко¹, В. В. Суслин²

¹ *Институт биологии южных морей имени А. О. Ковалевского РАН
Севастополь, 299011, Россия
E-mail: ila.82@mail.ru*

² *Морской гидрофизический институт РАН, Севастополь, 299011, Россия*

Проведены исследования многолетних сезонных изменений концентрации хлорофилла, первичной продукции фитопланктона и температуры воды в поверхностном слое в южном и восточном шельфовых районах Чёрного моря с 1998 по 2015 г. Для анализа трендов температуры воды, а также для расчёта концентрации хлорофилла и первичной продукции фитопланктона использовались данные спутниковых измерений SeaWiFS и MODIS. При анализе статистической значимости трендов многолетних изменений применён критерий Фишера, принимался уровень значимости $\alpha = 0,1$. На шельфе Анатолийского побережья и восточной части Чёрного моря трендов концентрации хлорофилла и продуктивности фитопланктона по осреднённым многолетним данным не отмечено. Характерна общая тенденция к незначительному снижению концентрации хлорофилла летом за 18-летний период, в остальные сезоны направленных изменений не выявлено. В отдельных районах наблюдалось слабое снижение первичной продукции в летний период и возрастание в зимний. Однако при высокой сезонной вариативности исследуемых показателей статистически значимых изменений выявить не удалось. Тенденции к возрастанию температуры по среднегодовым данным наблюдались почти по всей исследуемой прибрежной области Чёрного моря. Среднегодовое повышение температуры воды связано с потеплением воды в зимний сезон.

Ключевые слова: юго-восточная часть Чёрного моря, многолетние тренды, температура воды, фитопланктон, хлорофилл *a*, первичная продукция, спутниковые наблюдения

Одобрена к печати: 12.07.2021
DOI: 10.21046/2070-7401-2021-18-4-228-235

Введение

Шельфовая зона южной и восточной частей моря находится под влиянием стока горных рек и антропогенной нагрузки, а гидрологический режим этой области определяется Основным Черноморским течением (ОЧТ), степенью воздействия циклонических и антициклонического круговоротов, глубиной, особенностями рельефа и другими факторами. Поэтому экологическое состояние морской среды в этой области отличается от других районов Чёрного моря, и его оценка представляет интерес. Исследования прибрежной зоны проводились неоднократно (Ginzburg et al., 2004; Kopelevich et al., 2002; Oguz et al., 2006; Stelmakh, 2015) на отдельных акваториях в определённые временные периоды. Однако исследование одновременно первичной продукции фитопланктона, концентрации хлорофилла и температуры с использованием регулярных данных спутниковых наблюдений последних двух десятилетий на протяжённом участке шельфа ранее не рассматривалось. Использование спутниковых данных сделало доступным анализ и оценку экологического состояния фитопланктонного сообщества на больших акваториях. Проведённые исследования позволяют выявить особенности динамики и характерные тренды исследуемых показателей черноморского фитопланктона, а также температуры воды с 1998 по 2015 г. и оценить влияние глобального потепления в прибрежных южной и восточной частях Чёрного моря.

Цель работы — выявить сезонные и многолетние тренды концентрации хлорофилла, температуры воды и продукции фитопланктона в южном и восточном прибрежных районах Чёрного моря за 18-летний период.

Материалы и методы

В работе использовались спутниковые данные второго уровня с 1998 по 2008 г. и с 2008 по 2015 г. с пространственным разрешением ~ 1 км в надире, исследования проводились с помощью цветковых сканнеров (SeaWiFS \R2014.0\MLAC \Level-2), (MODIS/Aqua (англ. Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer) \R2018.0\LAC \Level-2) (MODIS/Terra \R2018.0\LAC \Level-2). Концентрация хлорофилла *a* рассчитана на основе алгоритма Морского гидрофизического института (для SeaWiFS и MODIS) (Suslin, Churilova, 2016). Продукт второго уровня включает время измерения, географическую привязку и спектр коэффициента яркости моря, температуру в поверхностном слое и интенсивность фотосинтетически активной радиации (ФАР) в диапазоне 400–700 нм. Концентрация хлорофилла получена на пространственной сетке $0,025^\circ$ по широте и $0,035^\circ$ по долготу. Средняя относительная ошибка восстановления по использованному алгоритму составила приблизительно 30 % (Суслин и др., 2018). Для расчёта продукции фитопланктона нами использовалась модель, описанная в работе (Finenko et al., 2019).

Тренды исследуемых показателей определялись по методу наименьших квадратов. Статистическая обработка данных проводилась в пакетах программ Sigma Plot 12.5, Grapher, Excel. Для анализа статистической значимости трендов многолетних изменений использовался критерий Фишера. В связи с осреднением на больших пространственных и временных масштабах и изменчивостью исследуемых показателей в широком диапазоне в различные сезоны для выявления тенденций нами принимался уровень значимости $\alpha = 0,1$.

Для расчётов и анализа были выделены районы в Чёрном море согласно гидрологическим особенностям: 1, 2 — западная и восточная части Анатолийского побережья соответственно; 3 — шельфовая зона на периферии Батумского круговорота; 4 — область Кавказского и Крымского побережья (рис. 1).

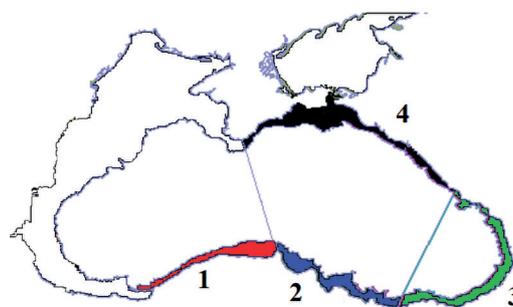


Рис. 1. Схема прибрежных районов в Чёрном море

Результаты

Многолетние тренды концентрации хлорофилла в прибрежной области Чёрного моря

Для оценки многолетних изменений концентрации хлорофилла рассматривались прибрежные районы 1–4. На шельфе Анатолийского побережья и северной части Чёрного моря (Кавказское и Крымское побережья) тренд концентрации хлорофилла при высокой вариабельности величин в различные годы отсутствовал (рис. 2).

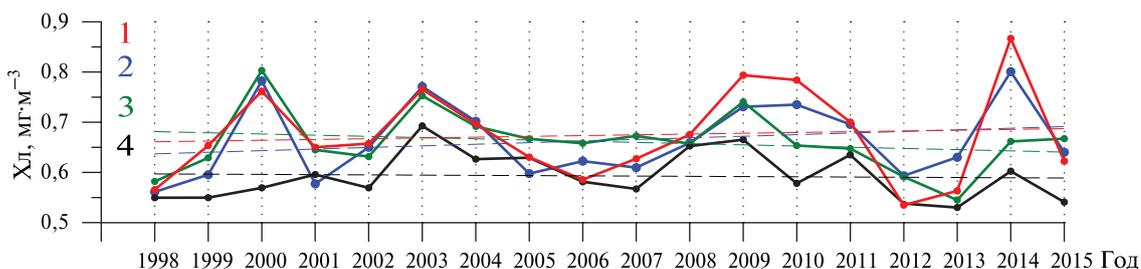


Рис. 2. Тренды среднегодовых значений концентрации хлорофилла в шельфовых районах Чёрного моря

Повышения концентрации хлорофилла *a* происходили лишь в отдельные годы (2000, 2003, 2009, 2010 и 2014 гг.). Сезонные изменения (согласно календарным сезонам) во всех рассматриваемых регионах были сходны. Отмечена общая тенденция к незначительному снижению концентрации хлорофилла летом за 18-летний период. В остальные сезоны изменений не наблюдалось. Таким образом, по всей шельфовой зоне в восточной части моря при высокой межсезонной вариабельности концентрации хлорофилла многолетний тренд не имел выраженных межгодовых тенденций на протяжении 18 лет.

Многолетние тренды продукции фитопланктона

Районы 1 и 2 находятся в южной части Чёрного моря вдоль Анатолийского побережья. Средние значения продукции в зимний и осенний периоды практически не различались по районам и составляли: зимой в районе 1 — 40,5 мгС·м⁻³·сут⁻¹, в районе 2 — 43,5 мгС·м⁻³·сут⁻¹, осенью — 26,5 и 27,5 мгС·м⁻³·сут⁻¹ соответственно. В тёплый период средние величины продукции фитопланктона за 18 лет в двух районах были существенно ниже: весной — 22,5 и 23 мгС·м⁻³·сут⁻¹, летом — 17 и 18 мгС·м⁻³·сут⁻¹.

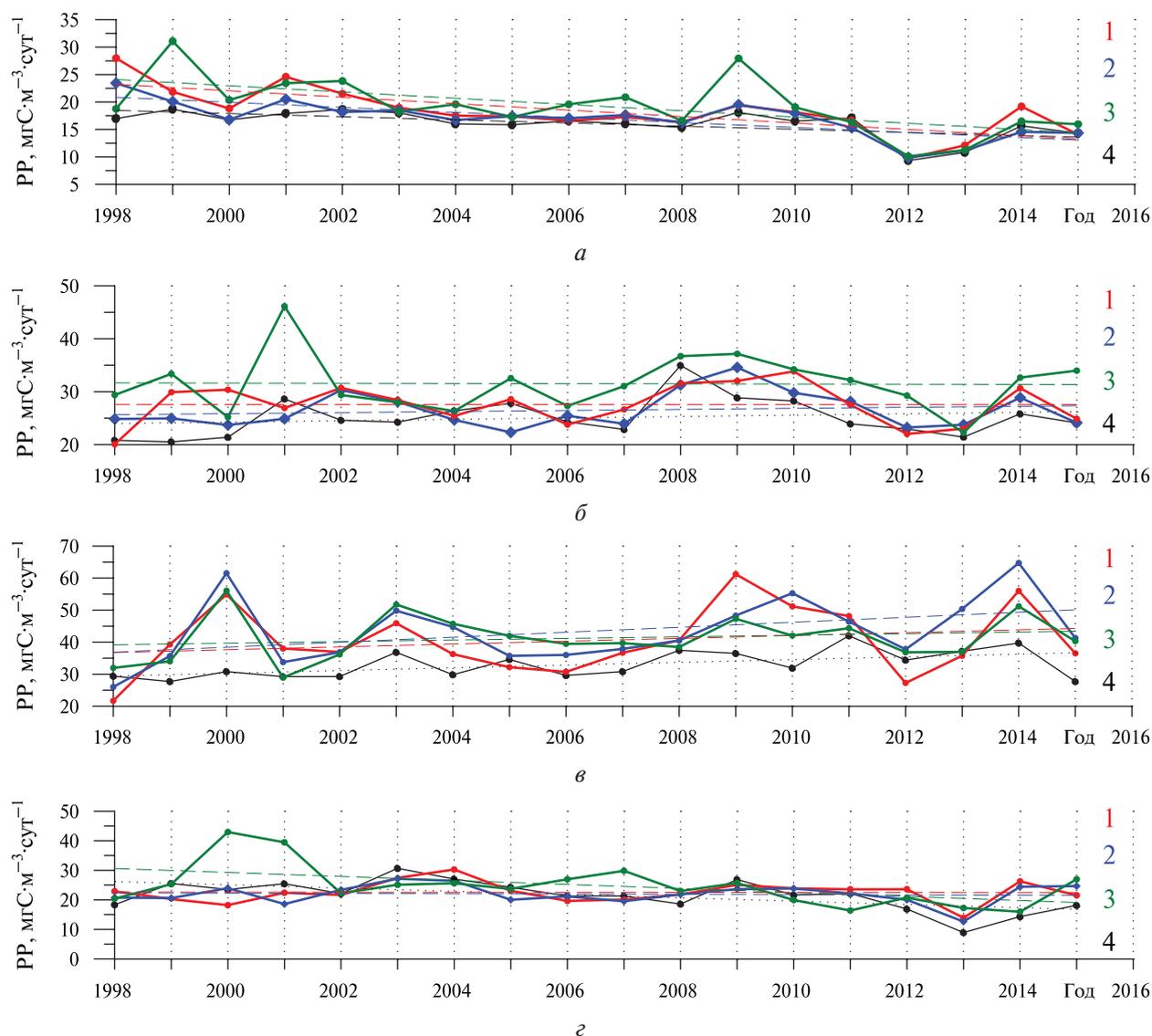


Рис. 3. Тренд сезонных изменений суточной продукции фитопланктона на шельфе южной и восточной частей Чёрного моря в районах: 1 — красный цвет, 2 — синий, 3 — зелёный, 4 — чёрный; а — лето, б — осень, в — зима, г — весна

В различные годы отмечена высокая вариабельность первичной продукции. Её увеличение наблюдалось в отдельные сезоны в 1999, 2000, 2001, 2003 гг. и во все сезоны 2009 и 2014 гг. Наибольшее снижение отмечалось летом; тенденция к увеличению зимой была статистически не достоверна, весной и осенью направленных изменений не наблюдалось (рис. 3, см. с. 230). По среднегодовым данным за 18 лет в обоих районах тренда не обнаружено, однако отмечено усиление вариабельности величин с 2009 г. (рис. 4).

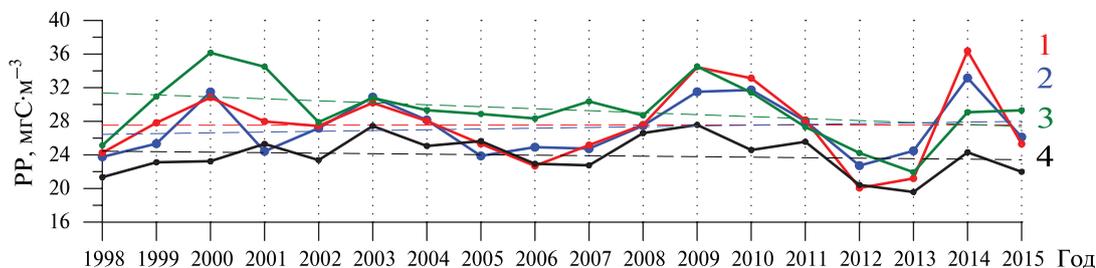


Рис. 4. Тренды среднегодовых значений продукции фитопланктона в разных районах Чёрного моря

В восточной части Анатолийского и Кавказского побережья, а также южного берега Крыма (районы 3, 4) сезонная изменчивость первичной продукции Чёрного моря варьировала в широких пределах. Величины первичной продукции зимой составляли 41 и 33 $\text{мгС}\cdot\text{м}^{-3}\cdot\text{сут}^{-1}$, летом — 19 и 16 $\text{мгС}\cdot\text{сут}^{-1}\cdot\text{м}^{-3}$. Согласно полученным данным, наиболее низкая продукция для всей шельфовой зоны Чёрного моря зарегистрирована вдоль северного Кавказа и Крымского побережья. В межгодовой динамике в отдельные сезоны повышение продукции фитопланктона отмечено в 2000, 2001, 2003, 2009, 2014 гг. и её уменьшение — в 2012 и 2013 гг. В регионе 3 зарегистрировано слабое снижение первичной продукции весной и летом, в регионе 4 — снижение летом, зимой — незначительное возрастание. По среднегодовым данным в районе 3 наблюдалась тенденция к снижению продукции по сравнению с другими районами, однако тренд всё же не был статистически значимым. В районе 4 тренда не обнаружено (см. рис. 4).

Таким образом, сезонные вариации величин первичной продукции в большинстве южных и восточных прибрежных районов не приводили к направленным изменениям показателя с 1998 по 2015 г. Изменения первичной продукции фитопланктона совпадали во времени с изменениями концентрации хлорофилла *a*.

Тренды температуры воды

В районах Анатолийского побережья (1, 2) отмечен слабый положительный тренд среднегодовой температуры воды в поверхностном слое: 4,2 и 3,2 % соответственно (рис. 5).

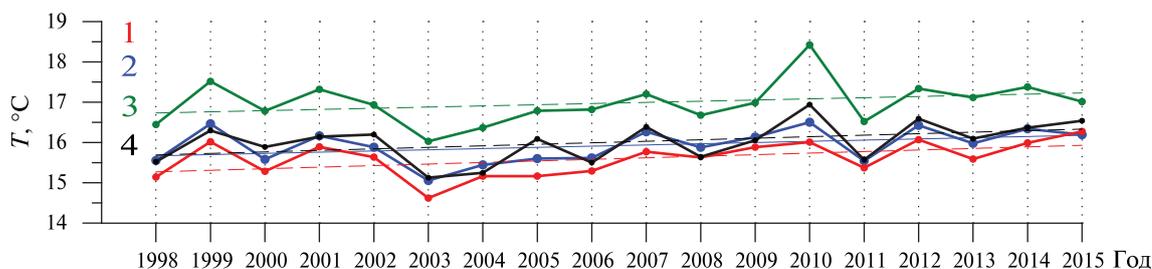


Рис. 5. Тренды среднегодовых значений температуры воды в поверхностном слое в прибрежных районах Чёрного моря

Сезонные изменения температуры воды в поверхностном слое в восточной части шельфа (регионы 3–4) находились в пределах 8,9–23,6 °С. По сезонам положительный тренд температуры в четырёх районах наблюдался преимущественно зимой, а также один раз в районе 4 весной; в другие сезоны статистически значимого тренда не наблюдалось. По среднегодовым данным прирост температуры на большем участке рассмотренного побережья составил 3–4 % (0,51–0,65 °С) за 18-летний период, за исключением Батумской прибрежной зоны, в которой выраженного тренда не выявлено. Указанные изменения близки к погрешности спутниковых измерений (0,44–0,48 °С) (<https://oceancolor.gsfc.nasa.gov/atbd/sst/>), но по результатам осреднения выявленные тенденции имеют направленный характер и повторяются на протяжении многих лет. Изменчивость температуры за 18 лет не привела к характерному повышению среднегодовой продукции фитопланктона либо к её понижению. Однако можно отметить корреляцию между наибольшим повышением температуры воды зимой и возрастанием первичной продукции в этот же период.

Таким образом, повышение температуры воды вдоль южного и восточного шельфов происходило приблизительно одинаково. Наибольшее увеличение температуры наблюдалось в районах 1 и 4 (на 4,17 и 3,95 %), тогда как близ Батумского шельфа прирост температуры воды с 1998 по 2015 г. не выражен, при этом среднегодовой уровень температуры в районе 3 был выше, чем в других. Особенности гидрологического режима в районе 3, по-видимому, связаны с воздействием Батумского антициклонического круговорота и более интенсивным обменом водных масс с глубоководной частью, чем в других шельфовых зонах. Это предположение позволяет нам установить близость границ антициклона к указанной части побережья согласно схемам поверхностных черноморских течений (Иванов, Белокопытов, 2011). За весь рассматриваемый период максимальные значения среднегодовой температуры отмечены в 2010 г., а минимальные — в 2003 г.

Обсуждение

Температура воды в поверхностном слое за различные временные интервалы исследовалась неоднократно (Белокопытов, 2013; Ковалёва, 2017; Полонский и др., 2013; Ginzburg et al., 2004; Kazmin, Zatsepin, 2007; Oguz et al., 2006). В наших исследованиях повышение температуры воды в Чёрном море выявлено по среднегодовым данным по всей исследуемой прибрежной акватории в диапазоне от 3 до 4 %. При этом в течение 18 лет концентрация хлорофилла и первичная продукция в рассмотренных районах сохранялась примерно на одном уровне. Снижение концентрации хлорофилла, которое характерно и для центральной части моря, в последние годы (Ковалёва, 2017) не распространялось на шельфовую зону. Некоторая тенденция к снижению продукционных показателей наблюдалась в прибрежной зоне вдоль Батуми, однако она незначима статистически. В исследованиях, проводившихся в августе 2015 г. в юго-восточной части моря, зарегистрировано резкое повышение концентрации хлорофилла, вызванное сдвигом инерционных течений под влиянием сильных ветровых явлений (Kubryakov et al., 2019). По нашим данным, в шельфовой зоне также наблюдалось повышение концентрации хлорофилла в конце лета 2015 г., хотя оно проявлялось в меньшей степени. Выраженной многолетней тенденции в этом районе не выявлено.

Заключение

В южных и восточных районах на большей части шельфовой зоны Чёрного моря по среднегодовым данным отмечены слабые статистически значимые положительные тренды температуры воды с увеличением в среднем на 3–4 % за 18-летний период (уровень значимости $\alpha = 0,1$). Прирост температуры по осреднённым данным составлял приблизительно 0,03 °С в год и происходил преимущественно за счёт зимнего сезона. Снижение первичной продукции в прибрежной зоне близ Батуми незначимо статистически. На большей части черноморского побережья тренды концентрации хлорофилла и продукции фитопланктона отсутство-

вали. Заметного влияния глобального потепления на развитие фитопланктона на юго-восточном шельфе не выявлено.

Работа выполнена в рамках государственного задания Института биологии южных морей имени А. О. Ковалевского РАН по теме «Функциональные, метаболические и токсикологические аспекты существования гидробионтов и их популяций в биотопах с различным физико-химическим режимом» (госрегистрация № 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».

Литература

1. Белокопытов В. Н. О климатической изменчивости термохалинной структуры Черного моря // Экологическая безопасность прибрежной и шельфовой зон и комплексные исследования ресурсов шельфа. Севастополь: ЭКОСИ-Гидрофизика, 2013. Т. 27. С. 226–230.
2. Иванов В. А., Белокопытов В. Н. Океанография Черного моря. Севастополь: ЭКОСИ-Гидрофизика, 2011. 212 с.
3. Ковалёва И. В. Моделирование сезонной и многолетней изменчивости первичной продукции фитопланктона в Черном море: дис. ... канд. биол. наук. Севастополь, 2017. 147 с.
4. Полонский А. Б., Шокурова И. Г., Белокопытов В. Н. Десятилетняя изменчивость температуры и солёности в Черном море // Морской гидрофиз. журн. 2013. № 6. С. 27–41.
5. Суслин В. В., Чурилова Т. Я., Ли М. Е., Мончева С., Финенко З. З. Концентрация хлорофилла а в Черном море: Сравнение спутниковых алгоритмов // Фундаментальная и прикладная гидрофизика. 2018. Т. 11. № 3. С. 64–72. DOI: 10.7868/S2073667318030085.
6. 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 J. Marine Biology. 2019. V. 45. No. 4. P. 313–319. DOI: 10.1134/S1063074019040059.
7. Ginzburg A. I., Kostianoy A. G., Sheremet N. A. Seasonal and interannual variability of the Black Sea surface temperature as revealed from satellite data (1982–2000) // J. Marine Systems. 2004. V. 52. P. 33–50. DOI: 10.1016/j.jmarsys.2004.05.002.
8. 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 // J. Marine Systems. 2007. V. 68. No. 1. P. 293–301. DOI: 10.1016/j.jmarsys.2007.01.002.
9. 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 // J. Marine Systems. 2002. V. 36. P. 145–160.
10. Kubryakov A. A., Zatsepin A. G., Stanichny S. V. Anomalous summer-autumn phytoplankton bloom in the Black Sea driven by several strong wind events // J. Marine Systems. 2019. V. 194. P. 11–24. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jmarsys.2019.02.004>.
11. Oguz T., Dippner J. W., Kaymaz Z. Climatic regulation of the Black Sea hydro-meteorological and ecological properties at interannual-to-decadal time scales // J. Marine Systems. 2006. V. 60. P. 235–254. DOI: 10.1016/j.jmarsys.2005.11.011.
12. Stelmakh L. V. Spatial and Temporal Variability of Carbon to Chlorophyll a Ratio in Phytoplankton of the Surface Layer in Shallow Water Areas of the Black Sea (Crimea) // Intern. J. Algae. 2015. V. 17. Iss. 4. P. 385–396. DOI: 10.1615/InterJAlgae.v17.i4.60.
13. 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 // Intern. J. Remote Sensing. 2016. V. 37. No. 18. P. 4380–4400. DOI: <http://dx.doi.org/10.1080/01431161.2016.1211350>.

Trends of long-term changes in chlorophyll concentration, primary production of phytoplankton and water temperature in the shelf regions of the Black Sea

I. V. Kovalyova¹, Z. Z. Finenko¹, V. V. Suslin²

¹ *A. O. Kovalevsky Institute of Biology of the Southern Seas RAS
Sevastopol 299011, Russia
E-mail: ila.82@mail.ru*

² *Marine Hydrophysical Institute RAS, Sevastopol 299011, Russia*

Studies of long-term seasonal changes in chlorophyll concentration, primary phytoplankton production and water temperature in the surface layer of the southern and eastern shelf zones of the Black Sea from 1998 to 2015 were conducted. SeaWiFS and MODIS satellite measurements were used to analyze trends in chlorophyll concentration and water temperature and to calculate phytoplankton primary production. Fisher's test was used to analyze the statistical significance of the trends of long-term changes. We took the significance level $\alpha = 0.1$. On the shelf of the Anatolian coast and the eastern part of the Black Sea, there were no trends in chlorophyll concentration and phytoplankton productivity according to averaged long-term data. There is a general tendency towards a slight decrease in the chlorophyll concentration in the summer over an 18-year period; in other seasons, no directional changes were revealed. In some areas, there was a slight decrease in primary production in the summer and an increase in the winter. However, with a high seasonal variability of the studied indicators, no statistically significant changes could be identified. According to average annual data, tendencies to an increase in temperature were observed almost over the entire investigated coastal region of the Black Sea. The average annual increase in water temperature was connected mainly with the temperature increase in winter.

Keywords: southeastern Black Sea, long-term trends, water temperature, phytoplankton, chlorophyll *a*, primary production, satellite observations

Accepted: 12.07.2021

DOI: 10.21046/2070-7401-2021-18-4-228-235

References

1. Belokopytov V. N., O klimaticheskoi izmenchivosti termokhaliinoi struktury Chornogo morya (On the climatic variability of the Black Sea thermohaline structure), In: *Ekologicheskaya bezopasnost' pribrezhnoi i shelfovoi zon i kompleksnye issledovaniya resursov shelfa*, Sevastopol: EKOSI-Gidrofizika, 2013, Vol. 27, pp. 226–230 (in Russian).
2. Ivanov V. A., Belokopytov V. N., *Oceanography of the Black Sea*, Sevastopol: EKOSI-Gidrofizika, 2011, 209 p. (in Russian).
3. Kovalyova I. V., *Modelirovanie sezonnoi i mnogoletnei izmenchivosti pervichnoi produktsii fitoplanktona v Chernom more: Diss. kand. boil. nauk* (Modeling seasonal and long-term variability of the primary production of phytoplankton in the Black Sea, Cand. boil. sci. thesis), Sevastopol, 2017, 147 p. (in Russian).
4. Polonskii A. B., Shokurova I. G., Belokopytov V. N., Ten-year variability of temperature and salinity in the Black Sea, *Morskoi gidrofizichskii zhurnal*, 2013, Vol. 6, pp. 27–41 (in Russian).
5. 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. *Fundamentalnaya i prikladnaya gidrofizika*, 2018, Vol. 11, No. 3, pp. 64–72 (in Russian), DOI: 10.7868/S2073667318030085.
6. 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 J. Marine Biology*, 2019, Vol. 45, No. 4, pp. 313–319, DOI: 10.1134/S1063074019040059.
7. Ginzburg A. I., Kostianoy A. G., Sheremet N. A., Seasonal and interannual variability of the Black Sea surface temperature as revealed from satellite data (1982–2000), *J. Marine Systems*, 2004, Vol. 52, pp. 33–50, DOI: 10.1016/j.jmarsys.2004.05.002.
8. 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, *J. Marine Systems*, 2007, Vol. 68, No. 1, pp. 293–301, DOI: 10.1016/j.jmarsys.2007.01.002.

9. 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, *J. Marine Systems*, 2002, Vol. 36, pp. 145–160.
10. Kubryakov A. A., Zatsepin A. G., Stanichny S. V., Anomalous summer-autumn phytoplankton bloom in the Black Sea driven by several strong wind events, *J. Marine Systems*, 2019, Vol. 194, pp. 11–24, DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jmarsys.2019.02.004>.
11. Oguz T., Dippner J. W., Kaymaz Z., Climatic regulation of the Black Sea hydro-meteorological and ecological properties at interannual-to-decadal time scales, *J. Marine Systems*, 2006. Vol. 60, pp. 235–254, DOI: 10.1016/j.jmarsys.2005.11.011.
12. Stelmakh L. V., Spatial and Temporal Variability of Carbon to Chlorophyll a Ratio in Phytoplankton of the Surface Layer in Shallow Water Areas of the Black Sea (Crimea), *Intern. J. Algae*, 2015, Vol. 17, Issue 4, pp. 385–396, DOI: 10.1615/InterJAlgae.v17.i4.60.
13. 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, *Intern. J. Remote Sensing*, 2016, Vol. 37, No. 18, pp. 4380–4400, DOI: <http://dx.doi.org/10.1080/01431161.2016.1211350>.