

# Тренды многолетних изменений первичной продукции фитопланктона совместно с концентрацией хлорофилла и температурой воды в шельфовых районах северо-западной части Чёрного моря

И. В. Ковалёва<sup>1</sup>, З. З. Финенко<sup>1</sup>, В. В. Суслин<sup>2</sup>

<sup>1</sup> *Институт биологии южных морей имени А. О. Ковалевского РАН  
Севастополь, 299011, Россия*

<sup>2</sup> *Морской гидрофизический институт РАН, Севастополь, 299011, Россия  
E-mail: ila.82@mail.ru*

Исследованы многолетние сезонные изменения концентрации хлорофилла, первичной продукции фитопланктона и температуры воды в шельфовой зоне северо-западной части Чёрного моря с 1998 по 2015 г. Для анализа использовались данные со спутников SeaWiFS с 1998 по 2008 г. и MODIS с 2008 по 2015 г., полученные для поверхностного слоя моря. Концентрация хлорофилла *a* и первичная продукция фитопланктона рассчитывались по ранее разработанным нами моделям для черноморского фитопланктона. Тренды исследуемых показателей определялись по методу наименьших квадратов. В придунайском районе выявлен положительный тренд среднегодовых значений концентрации хлорофилла при уровне значимости  $p < 0,1$  и отсутствие статистически значимого тренда первичной продукции. На остальных акваториях северного и западного побережья выраженных трендов концентрации хлорофилла и первичной продукции не отмечено. В районе, подверженном стоку р. Дунай, средняя за 18 лет продукция фитопланктона была наиболее высокой по сравнению с другими районами и составляла  $87,05 \pm 25,75 \text{ мгС} \cdot \text{м}^{-3} \cdot \text{сут}^{-1}$ . Положительные тренды температуры наблюдались на большей части западной прибрежной области Чёрного моря и района свала глубин при уровне значимости  $p < 0,1$ . Проведённые исследования показали отсутствие заметных изменений в развитии фитопланктона в связи с глобальным потеплением.

**Ключевые слова:** северо-западная часть Чёрного моря, многолетние тренды, температура воды, фитопланктон, хлорофилл *a*, первичная продукция, спутниковые данные

Одобрена к печати: 13.07.2022

DOI: 10.21046/2070-7401-2022-19-4-239-248

## Введение

Прибрежные районы северо-западной части Чёрного моря более подвержены влиянию внешних факторов из-за стока крупных рек и промышленной деятельности, чем другие районы моря. Поэтому временная динамика фитопланктона может быть показательна для оценки экологического состояния морской среды. Шельфовая зона, преимущественно отдельные её акватории, исследовалась в течение многих лет (Белевич, Орлова, 1996; Микаэлян, 2018; Полонский, 1997; Финенко и др., 2008; Шокурова и др., 2004; Kopelevich et al., 2002; Stelmakh, 2015). До середины 1990-х гг. проводились экспедиционные исследования, в основном эпизодически, что затрудняло выявление непрерывных долгопериодных трендов исследуемых показателей. С помощью спутниковых наблюдений удалось решить этот вопрос и отслеживать изменения важных характеристик в океане за длительные интервалы времени на больших акваториях, а также моделировать процессы, протекающие в экосистеме. В современных морских исследованиях насчитывается всё больше работ с использованием спутниковых данных (Артамонов и др., 2020; Kopelevich et al., 2002).

В нашей работе ставилась задача провести оценку совместных изменений трёх характеристик: температуры воды, концентрации хлорофилла и первичной продукции фитопланктона — в северо-западной части Чёрного моря. Различные участки прибрежной зоны имеют свои особенности, зависящие от разных факторов, поэтому возможны различия в развитии фитопланктона в этих районах. Может быть более заметной или менее заметной роль глобального

потепления и его влияния на первичную продукцию. Оценка тенденций указанных показателей по всей поверхности моря за два ближайших десятилетия ранее не проводилась. Поэтому мы выбрали для анализа различные районы в Чёрном море согласно гидрологическим особенностям. В предыдущей работе нами исследовались южная и восточная части шельфа (Ковалёва и др., 2021). Анализ непрерывных данных с использованием единого способа расчёта параметров и единой базы спутниковых наблюдений позволит цельнее оценить влияние антропогенного фактора и глобального потепления на протяжённых акваториях Чёрного моря, а также выявить характерные тенденции за период 1998–2015 гг.

## Материалы и методы

В работе использовались два блока спутниковых данных: SeaWiFS (*англ.* Sea-Viewing Wide Field-of-View Sensor) с 1998 по 2008 г. и MODIS (*англ.* Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer) с 2008 по 2015 г. — с пространственным разрешением  $\sim 1$  км в надире (<https://oceancolor.gsfc.nasa.gov/>). Измерения проводились ежедневно и усреднялись за двухнедельный период. Получены данные второго уровня о времени измерения, географических координатах, а также спектр коэффициента яркости моря. Взяты температура в поверхностном слое (для 1998–1999 гг. источник <http://podaac.jpl.nasa.gov/sst/>, для 2000–2015 гг. — MODIS-Aqua/Terra) и фотосинтетически активная радиация (ФАР) в диапазоне 400–700 нм (<https://oceancolor.gsfc.nasa.gov/atbd/par/>). Концентрация хлорофилла  $a$  рассчитана на основе алгоритма Морского гидрофизического института РАН (Suslin, Churilova, 2016). Средняя относительная ошибка восстановления концентрации хлорофилла  $a$  по использованному алгоритму составила приблизительно 30–40 % (Суслин и др., 2018). Для расчёта продукции фитопланктона нами использовалась модель, описанная в работе (Finenko et al., 2019). Входные параметры в модель расчёта первичной продукции для черноморского фитопланктона ( $P_m = \alpha^B E_k$ , где  $E_k$  — начало светового насыщения фотосинтеза (моль квантов  $\cdot \text{м}^{-2} \cdot \text{сут}^{-1}$ );  $\alpha^B$  — тангенс угла наклона кривой «фотосинтез–свет», нормированный на концентрацию хлорофилла) имели коэффициенты детерминации  $r^2 = 0,7$ ,  $r^2 = 0,95$  для зависимостей, полученных *in situ*. Чистая суточная продукция фитопланктона ( $\text{мгС} \cdot \text{м}^{-3} \cdot \text{сут}^{-1}$ ) определялась как:

$$P = X_{\text{л}0} \cdot P_m \cdot \text{th} \left( \frac{\alpha^B E_0}{P_m} \right),$$

где  $X_{\text{л}0}$  — концентрация хлорофилла в поверхностном слое,  $\text{мг} \cdot \text{м}^{-3}$ ;  $P_m$  — максимальная скорость фотосинтеза, нормированная на единицу хлорофилла,  $\text{мгС} \cdot \text{мгХл}^{-1} \cdot \text{сут}^{-1}$ .

Статистическая обработка данных проводилась в пакетах программ Sigma Plot 12,5, Grapher, Excel. Тренды исследуемых показателей определялись по методу наименьших квадратов. Для анализа статистической значимости трендов многолетних изменений использовался критерий Фишера. Для выявления тенденций нами принимался уровень значимости  $p = 0,1$ .

Для расчётов и анализа были выделены районы в Чёрном море согласно гидрологическим особенностям и стоку рек до глубины 50 и 500 м (*рис. 1*): 1 — приднепровский район северо-западного шельфа; 2 — придунайская шельфовая зона; 3а — район Бургасского зал.; 3б — район Босфорского пролива; 4а–с — область свала глубин.

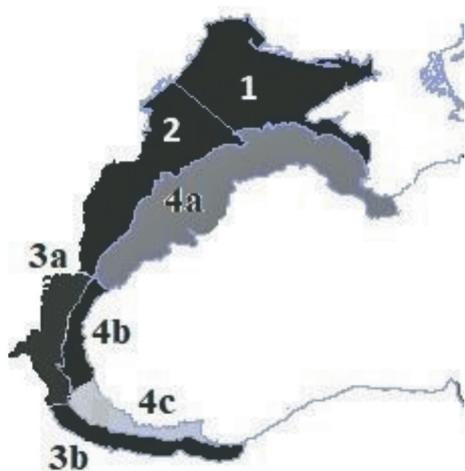


Рис. 1. Схема прибрежных районов в Чёрном море

## Результаты

### Многолетние тренды концентрации хлорофилла *a* в северо-западной прибрежной области Чёрного моря

Оценивались тренды многолетних изменений концентрации хлорофилла для прибрежных районов 1–3 (а, б) и области свала глубин (районы 4а–с) (рис. 2). Наиболее заметные возрастания величин происходили в прибрежных районах в 2009 и 2013–2014 гг. (см. рис. 2а), а также в 2003 и 2009 гг. в области свала глубин (см. рис. 2б).

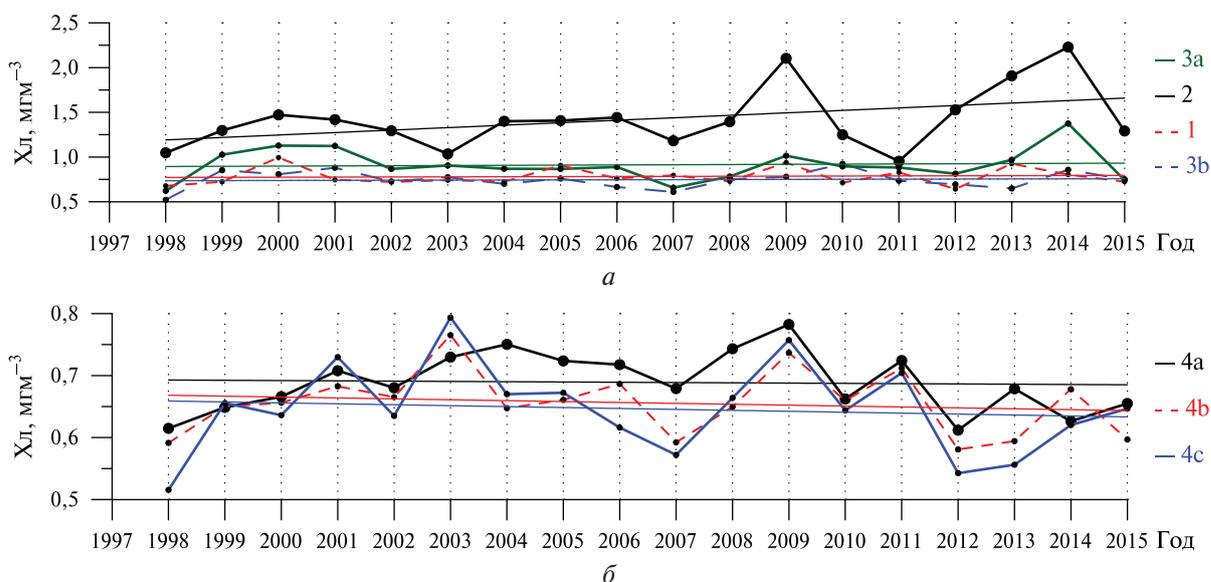


Рис. 2. Тренды среднегодовых значений концентрации хлорофилла: а — в северо-западной части шельфовой зоны Чёрного моря (районы 1, 2, 3а, б); б — области свала глубин (районы 4а–с)

В районе стока р. Дунай (район 2) отмечен характерный статистически значимый положительный тренд. По среднегодовым данным за весь исследуемый период повышение концентрации хлорофилла составило 30 % (см. рис. 2) при уровне значимости  $p < 0,1$ . По расчётам неосреднённых регулярных двухнедельных данных за 18-летний период возрастание тренда отмечено на 28,4 % при  $p < 0,05$ . По нашим оценкам, возрастание происходило преимущественно за счёт весеннего и зимнего сезонов. В остальных выделенных районах статистически значимые тренды концентрации хлорофилла отсутствовали.

Таким образом, на большей части западной прибрежной акватории многолетний тренд концентрации хлорофилла отсутствовал на протяжении 18 лет. В районе стока р. Дунай наблюдался положительный тренд. Однако следует отметить, что почти по всей шельфовой зоне концентрация хлорофилла имела высокую межсезонную вариабельность. Среднегодовое значение концентрации хлорофилла за 18 лет для района 2 составляло  $1,42 \pm 0,34 \text{ мг} \cdot \text{м}^{-3}$  с вариациями показателя от 0,95 до  $2,23 \text{ мг} \cdot \text{м}^{-3}$ , для района 1 —  $0,78 \pm 0,10 \text{ мг} \cdot \text{м}^{-3}$ , 3а —  $0,91 \pm 0,18 \text{ мг} \cdot \text{м}^{-3}$ , 3б —  $0,75 \pm 0,10 \text{ мг} \cdot \text{м}^{-3}$ , 4а —  $0,69 \pm 0,05 \text{ мг} \cdot \text{м}^{-3}$ , 4б —  $0,66 \pm 0,05 \text{ мг} \cdot \text{м}^{-3}$ , 4с —  $0,65 \pm 0,07 \text{ мг} \cdot \text{м}^{-3}$ .

### Многолетние тренды продукции фитопланктона в прибрежных районах западной части моря

Приднепровский и придунайский районы (1 и 2) подвержены влиянию стока крупных рек. Однако в районе 2 средняя за 18 лет продукция фитопланктона выше ( $87,05 \pm 25,75 \text{ мгС} \cdot \text{м}^{-3} \cdot \text{сут}^{-1}$ ), чем в районе 1 ( $36,06 \pm 11,31 \text{ мгС} \cdot \text{м}^{-3} \cdot \text{сут}^{-1}$ ). Особенно высокие

значения первичной продукции наблюдались в акватории, подверженной стоку р. Дунай в весенний и летний периоды:  $94,1$  и  $133,6 \text{ мгС}\cdot\text{м}^{-3}\cdot\text{сут}^{-1}$  соответственно. Возрастание продукции в этих районах приходилось преимущественно на период паводка, начиная с весны и достигая своего максимума летом. К осени происходило снижение величин первичной продукции, и зимой наблюдались её минимальные значения ( $49,9 \text{ мгС}\cdot\text{м}^{-3}\cdot\text{сут}^{-1}$  в районе 2 и  $29,5 \text{ мгС}\cdot\text{м}^{-3}\cdot\text{сут}^{-1}$  в районе 1). В межгодовой динамике первичной продукции в районе 1 можно выделить 2000, 2005 и 2009 гг., а в районе 2 — 2009 и 2014 гг., когда более заметно происходил её рост (рис. 3). В зимний период в придунайской шельфовой области наблюдалась тенденция к увеличению продукции с 1998 по 2015 г. и слабому снижению осенью ( $p < 0,1$ ). В приднепровском районе статистически значимых трендов в различные сезоны не отмечено. Остальные сезоны в северо-западной части моря характеризовались высокой вариабельностью продукции фитопланктона, результатом этого стало отсутствие статистически значимых трендов, рассчитанных по среднегодовым данным в двух районах (см. рис. 3).

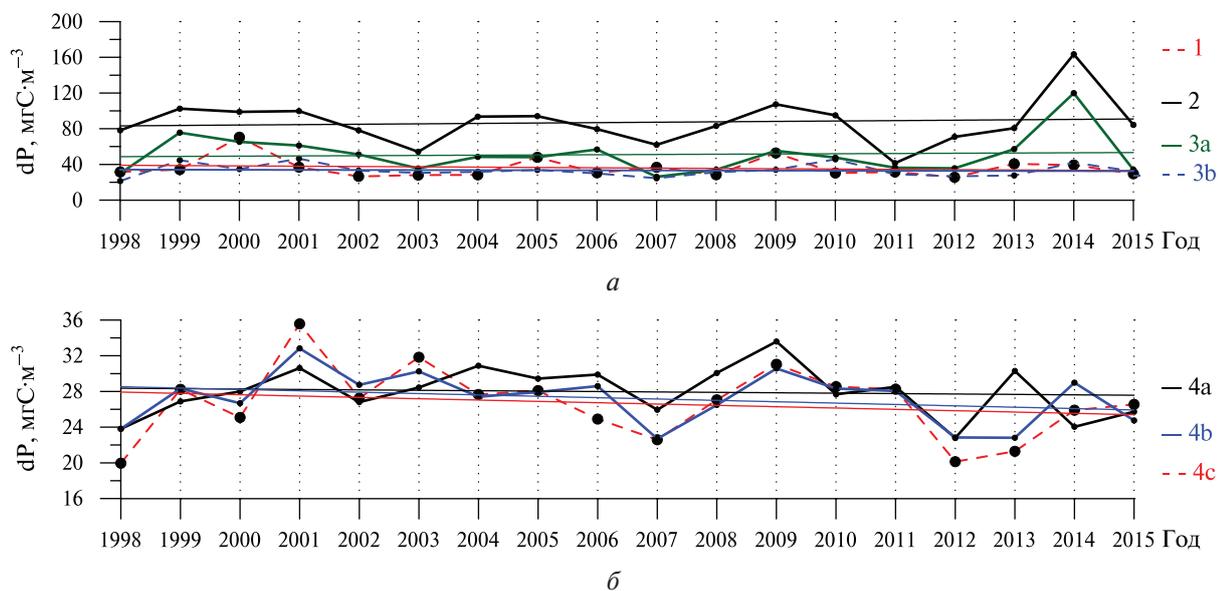


Рис. 3. Тренды среднегодовых значений продукции фитопланктона: *а* — в северо-западной части шельфовой зоны Чёрного моря; *б* — в области свала глубин

Сезонная динамика в районе близ Бургасского зал. (3а) схожа с приднепровским и придунайским районами. Возрастание средних значений продукции происходило в весенний период ( $50 \text{ мгС}\cdot\text{м}^{-3}\cdot\text{сут}^{-1}$  с вариацией величин от 24 до  $116 \text{ мгС}\cdot\text{м}^{-3}\cdot\text{сут}^{-1}$ ) и летом ( $64 \text{ мгС}\cdot\text{м}^{-3}\cdot\text{сут}^{-1}$  с вариацией величин от 18 до  $232 \text{ мгС}\cdot\text{м}^{-3}\cdot\text{сут}^{-1}$ ). Высокая вариабельность показателей обусловлена преимущественно весенним паводком. Осенью и зимой в среднем за 18 лет первичная продукция достигала в районе Бургасского зал.  $47\pm 29$  и  $40\pm 10 \text{ мгС}\cdot\text{м}^{-3}\cdot\text{сут}^{-1}$  соответственно, а в районе Босфорского пролива —  $38\pm 14$  и  $40\pm 12 \text{ мгС}\cdot\text{м}^{-3}\cdot\text{сут}^{-1}$ . Уровень первичной продукции в обеих акваториях по ходу основного черноморского течения снижается. Если рассматривать по сезонам значения продуктивности в прибосфорском районе, то максимальных величин они достигают обычно зимой ( $40 \text{ мгС}\cdot\text{м}^{-3}\cdot\text{сут}^{-1}$ ), минимальных — летом ( $26 \text{ мгС}\cdot\text{м}^{-3}\cdot\text{сут}^{-1}$ ); по осреднённым данным за 18-летний период, весной величина первичной продукции составляла  $30 \text{ мгС}\cdot\text{м}^{-3}\cdot\text{сут}^{-1}$ . Во все сезоны в обоих районах (3а и 3б) тренд отсутствовал. Некоторое повышение среднегодовых значений продукции фитопланктона можно отметить в 1999 и 2014 гг. и снижение — в 2003 и 2007 гг.

Область от 50 м до линии свала глубин (500 м) выделена на карте (см. рис. 1) как районы 4а–с. В сезонной динамике первичной продукции фитопланктона в данной области отмечены наиболее высокие значения в зимний период, минимальные — летом; весной и осе-

нию значения находились приблизительно на одном уровне. Средние за 18 лет величины продукции фитопланктона зимой в исследуемых районах равны соответственно 35,8; 32,6; 34,6  $\text{мгС}\cdot\text{м}^{-3}\cdot\text{сут}^{-1}$ , в летний период — 21,4; 22,9; 19,2  $\text{мгС}\cdot\text{м}^{-3}\cdot\text{сут}^{-1}$ . В течение 18-летнего периода межгодовые изменения первичной продукции были выражены слабо, закономерных повышений либо понижений величин не наблюдалось. Рост среднегодовых величин можно отметить в 2001 и 2009 гг., снижение — в 2007 и 2012 гг. (см. рис. 3).

Таким образом, выраженных трендов первичной продукции фитопланктона в северо-западной части Чёрного моря и области свала глубин не наблюдалось. Лишь в зимний период в придунайском районе отмечено незначительное увеличение, которое, однако, не привело к повышению общей среднегодовой продуктивности.

### Тренды температуры воды в западной прибрежной зоне

Температура воды на поверхности в прибрежных водах северо-западного региона, а также в области свала глубин до 500 м варьировала от 2,2 до 28,5 °C за 18 лет. В течение всего периода по сезонам в приднепровском районе отмечен тренд повышения температуры воды весной и понижения осенью. По среднегодовым данным, статистически значимый тренд в указанной акватории отсутствовал. В придунайском районе наблюдалось повышение температуры воды в поверхностном слое в зимний период. По среднегодовым данным, за 18 лет прирост температуры в придунайском районе (рис. 4) составил 4,5 % при уровне значимости  $p < 0,1$ .

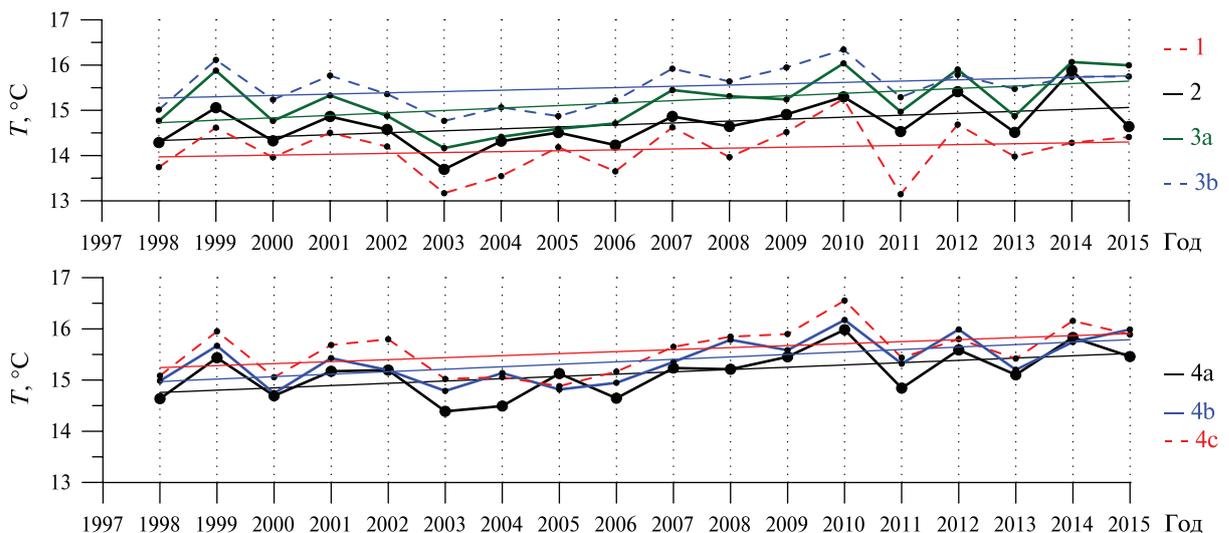


Рис. 4. Тренды среднегодовых значений температуры воды в поверхностном слое в различных районах Чёрного моря

Диапазоны изменения температуры в области Бургасского зал. — от 3,6 до 27,5 °C, а у Босфорского пролива — от 3,8 до 27,6 °C. Статистически значимое возрастание температуры воды в бургасском и прибосфорском районах также отмечено только в зимний сезон. За 18-летний период наблюдалось повышение среднегодовых значений температуры воды в районе 3a на 5,9 %, в районе 3b оно отсутствовало. Прослеживалось соответствие между периодами повышения и понижения продукции фитопланктона, концентрацией хлорофилла и температурой воды в поверхностном слое. Наиболее выражены повышения всех показателей были в 2014 г., понижения — в 2003 г.

Многолетние сезонные вариации температуры воды в поверхностном слое в области материкового склона (районы 4a–с) оказались под влиянием прибрежных вод и глубоководной области. Среднегодовые значения температуры воды в течение 18 лет в указанной акватории

принимали значения в диапазоне 15,14–15,57 °С. Слабое повышение температуры воды в поверхностном слое в течение 18 лет наблюдалось обычно зимой и весной. По среднегодовым значениям отмечены положительные тренды в пределах 4,2–5,2 %, тогда как тренды концентрации хлорофилла и первичной продукции в этой области отсутствовали.

Таким образом, отмечено повышение температуры воды за многолетний период в некоторых районах (2, 3а, 4а–с) в пределах 4,2–5,9 % при уровне значимости  $p < 0,1$ , обусловленное возрастанием температуры в холодный сезон.

## Обсуждение

В исследованиях температурного режима (Белокопытов, Шокурова, 2005; Шокурова и др., 2004; Ginzburg et al., 2004; Oguz et al., 2006) отмечались как периоды повышения температуры воды, так и снижения в отдельные годы и сезоны в поверхностном слое в различных районах Чёрного моря. По нашим расчётам с использованием данных спутниковых наблюдений, повышение температуры воды также происходило неодинаково в различные сезоны. Прирост температуры наблюдался за счёт зимнего сезона. В среднем за 1998–2015 гг. в шельфовой зоне северо-западной части Чёрного моря в рассмотренных районах тенденция к возрастанию температуры отмечена следующая: в приднепровском регионе она отсутствовала, в придунайском происходила до 4,5 %, у Бургасского зал. — до 5,9 %, вблизи Босфорского пролива она отсутствовала и 4,2–5,2 % достигала в области свала глубин. Эти различия, по-видимому, связаны с особенностями шельфа, глубины, стока рек, а также с течениями и вихреобразованием, которые определяют гидрологический режим вод. На большей части шельфовой акватории основное черноморское течение, а также разница в солёности создают барьер для перемешивания водных масс центральных и прибрежных районов, из-за чего можно наблюдать более стабильные характеристики в области свала глубин, чем в шельфовой в зоне до 50 м. Различия в гидрологическом режиме приводят к неравномерному и нестабильному потеплению вод в поверхностном слое по всей поверхности черноморского шельфа. В предыдущем нашем исследовании Анатолийского, Кавказского и Крымского шельфов (Ковалёва и др., 2021) отмечено также неравномерное повышение температуры на 3–4 % за 18 лет в некоторых районах, кроме побережья близ Батуми, где оно не выражено. Как видно, в юго-восточной части оно меньше, чем в северо-западной. В прибрежных западном и северо-западном районах наблюдалось совпадение между характером изменения температуры, концентрацией хлорофилла и первичной продукции. Однако выявленное слабое нестабильное повышение температуры воды не привело к увеличению среднегодовой продукции фитопланктона на рассматриваемой части прибрежной акватории. Только зимой наблюдалось некоторое её повышение в придунайской области, что может быть отчасти обусловлено повышением зимней температуры. Слабое возрастание продуктивности зимой отмечено ещё в районе северо-восточного шельфа (Ковалёва и др., 2021), в остальных же регионах статистически значимых положительных тенденций не выявлено. Незначительное снижение продукции отмечено осенью только в придунайской шельфовой зоне, тогда как в восточной и северо-восточной прибрежных зонах снижение выражено летом (Ковалёва и др., 2021). Наблюдался положительный тренд концентрации хлорофилла в районе стока р. Дунай, преимущественно за счёт зимнего и весеннего сезона, что также частично может быть связано с температурным режимом. Предположительно, это ещё может свидетельствовать о влиянии антропогенного фактора в данной области и возможной перестройке фитопланктонного сообщества, так как в придунайском районе при увеличении концентрации хлорофилла на 30 % за 18 лет статистически значимый тренд среднегодовой первичной продукции отсутствовал. Увеличение концентрации хлорофилла началось в зимний период и ещё более заметно — в зимний и весенний периоды после 2009 г. Зимой же наблюдалось и слабое возрастание продуктивности, которое не было столь выраженным и не привело к возрастанию среднегодовой продукции. Вероятно, произошли изменения в видовом составе доминирующих в указанный сезон водорослей. О таких изменениях в некоторых районах Чёрного моря упоминалось в работах (Воробьева

и др., 2014; Востоков и др., 2019). По данным, полученным в последние годы (Востоков и др., 2019), в связи с тёплыми зимами всё больше наблюдается цветение кокколитофорид в холодный период, что в отдельных случаях приводило к повышению продуктивности фитопланктона. Согласно данным исследований (см., например, работу (Скрипник, Кирсанова, 2001)), в 1998–1999 гг. в Одесском зал. также отмечено несовпадение величин первичной продукции и концентрации хлорофилла *a*, что связывают как с видовым составом, так и со зрелостью фитопланктона. По одной из теорий, рост концентрации хлорофилла в зимний период может быть вызван изменением размера клеток (Brewin et al., 2010). Однако этот вопрос для данной акватории требует дополнительных исследований. При этом отсутствие выраженного увеличения первичной продукции при повышении концентрации хлорофилла в регионе в холодный сезон может свидетельствовать об ингибировании продукции низкой температурой воды у берега. Общий ход сезонной динамики концентрации хлорофилла, представленный ранее (Востоков и др., 2019; Кириленко, Евстигнеев, 2017), и первичной продукции фитопланктона (Скрипник, Кирсанова, 2001) имеет сходный характер с полученными нами результатами по сезонам.

## Заключение

В большинстве районов северо-западной и западной шельфовых зон Чёрного моря и области свала глубин отмечены статистически значимые среднегодовые положительные тренды температуры воды с увеличением в среднем на 4,2–5,9 % за 18-летний период. Повышение температуры происходило в холодный сезон. Различия в степени повышения температуры на рассмотренных участках могут быть связаны с особенностями стока рек, глубины и гидрологического режима на этой акватории. На большей части черноморского побережья среднегодовые тренды концентрации хлорофилла *a* и продукции фитопланктона отсутствовали. Тенденции к росту указанных показателей отмечены только в холодный сезон. Положительный тренд среднегодовой концентрации хлорофилла отмечен лишь в придунайском районе, где наиболее выражено влияние антропогенной нагрузки. Проведённые исследования могут свидетельствовать об отсутствии заметного влияния глобального потепления на процессы, протекающие в шельфовой зоне северо-западной части Чёрного моря, за исключением зимнего периода.

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. Артамонов Ю. В., Скрипалева Е. А., Колмак Р. В., Федирко А. В. Сезонная изменчивость температурных фронтов Черного моря по спутниковым данным // Исслед. Земли из космоса. 2020. № 1. С. 52–69. DOI: 10.31857/S0205961420010030.
2. Белевич Р. Р., Орлова И. Г. Особенности межгодовой изменчивости гидролого-гидрохимических характеристик вод на северо-западном шельфе Черного моря в последние десятилетия (60–90-е гг.) // Морской гидрофиз. журн. 1996. Т. 2(III–IV). С. 72–73.
3. Белокопытов В. Н., Шокурова И. Г. Оценки междесятилетней изменчивости температуры и солёности в Черном море в период 1951–1995 гг. // Эколог. безопасность прибрежной и шельфовой зон и комплексное использование ресурсов шельфа. 2005. № 12. С. 12–21. URL: <https://www.researchgate.net/publication/285860124>.

4. Воробьева Л. В., Нестерова Д. А., Полищук Л. Н., Кулакова И. И., Синегуб И. А. Современное состояние пелагических и донных сообществ северо-западной части Черного моря // Вестн. Одесского нац. ун-та. Сер.: Географ. и геол. науки. 2014. Т. 19. Вып. 1. С. 113–120.
5. Востоков С. В., Лобковский Л. И., Востокова А. С., Соловьев Д. М. Сезонная и многолетняя изменчивость фитопланктона в Черном море по данным дистанционного зондирования и контактными измерениями хлорофилла *a* // Докл. Акад. наук. 2019. Т. 485. № 1. С. 99–103. DOI: 10.31857/S0869-5652485199-103.
6. Кириленко Н. Ф., Евстигнеев В. П. Изменчивость содержания хлорофилла *a* в северо-западной части Черного моря в современных климатических условиях // Системы контроля окружающей среды. 2017. Т. 4 С. 80–87. DOI: 10.33075/2220-5861-2017-4-80-87.
7. Ковалёва И. В., Финенко З. З., Суслин В. В. Тренды многолетних изменений концентрации хлорофилла, первичной продукции фитопланктона и температуры воды на шельфе в южном и восточном районах Чёрного моря // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2021. Т. 18. № 4. С. 228–235. DOI: 10.21046/2070-7401-2021-18-4-228-235.
8. Микаэлян А. С. Временная динамика фитопланктона глубоководного бассейна Черного моря: дис. ... д-ра биол. наук. М., 2018. 266 с.
9. Полонский А. Б. Изменчивость гидрологических характеристик северо-западной части Черного моря, вызванная крупномасштабными процессами // Метеорология и гидрология. 1997. Т. 3. С. 59–70.
10. Скрипник И. А., Кирсанова Е. В. Первичная продукция в северо-западной части Черного моря // Наукові записки Тернопільського педуніверситету. Сер.: Біологія. Спец. вип. «Гідроекологія». 2001. Т. 14. № 3. С. 158–160.
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., Чурилова Т. Я., Пархоменко А. В., Тугрул С. Фотосинтетические характеристики фитопланктона в западной части Чёрного моря в период осеннего цветения // Морской эколог. журн. 2008. Т. 7. № 4. С. 75–84.
13. Шокурова И. Г., Пластун Т. В., Белокопытов В. Н., Халиулин А. Х. Сравнительный анализ изменчивости гидрологических характеристик вод северо-западного шельфа и центральной части моря // Эколог. безопасность прибрежной и шельфовой зон и комплексное использование ресурсов шельфа. Севастополь: ЭКОСИ-Гидрофизика, 2004. Вып. 10. С. 17–26.
14. Brewin R., Sathyendranath S., Hirata T., Lavender S. J., Barciela R. M., Hardman-Mountford N. A three-component model of phytoplankton size class for the Atlantic Ocean // Ecological Modelling. 2010. V. 221. P. 1472–1483. DOI: 10.1016/j.ecolmodel.2010.02.014.
15. 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.
16. 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 System. 2004. V. 52. P. 33–50.
17. 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 System. 2002. V. 36. Iss. 3–4. P. 145–160.
18. 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 System. 2006. V. 60. P. 235–254.
19. 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. No. 4. P. 385–396. DOI: 10.1615/InterJAlgae.v17.i4.60.
20. 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. Remounting Sensing. 2016. V. 37. No. 18. P. 4380–4400. DOI: 10.1080/01431161.2016.1211350.

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

I. V. Kovalyova<sup>1</sup>, Z. Z. Finenko<sup>1</sup>, V. V. Suslin<sup>2</sup>

<sup>1</sup> A. O. Kovalevsky Institute of Biology of the Southern Seas RAS  
Sevastopol 299011, Russia

<sup>2</sup> Marine Hydrophysical Institute RAS, Sevastopol 299011, Russia  
E-mail: [ila.82@mail.ru](mailto:ila.82@mail.ru)

The long-term seasonal changes in chlorophyll concentration, primary phytoplankton production and water temperature in the shelf zone of the northwestern part of the Black Sea from 1998 to 2015 were studied. Data from SeaWiFS satellites from 1998 to 2008 and MODIS from 2008 to 2015, obtained for the surface layer of the sea, were used for the analysis. The concentration of chlorophyll a and the primary production of phytoplankton were calculated using previously developed models for the Black Sea phytoplankton. The trends of the studied indicators were determined by the least squares method. In the Danube region, a positive trend (at the significance level  $p < 0.1$ ) of average annual values of chlorophyll concentration was revealed in the absence of a statistically significant trend in primary production. In the remaining waters of the northern and western coasts, there were no pronounced trends in the concentration of chlorophyll and primary products. In the area exposed to the Danube River runoff, the average phytoplankton production over 18 years was the highest compared to other areas and was  $(87.05 \pm 25.75 \text{ mgC} \cdot \text{m}^{-3} \cdot \text{day}^{-1})$ . Positive temperature trends were observed in most of the coastal area of the Black Sea and the area of the depth dump in the western part of the sea (at the significance level  $p < 0.1$ ). The conducted studies have shown the absence of noticeable changes in the development of phytoplankton due to global warming.

**Keywords:** northwestern part of the Black Sea, 18-year trends, water temperature, phytoplankton, chlorophyll a, primary production, satellite data

Accepted: 13.07.2022

DOI: 10.21046/2070-7401-2022-19-4-239-248

### References

1. Artamonov Yu. V., Skripaleva E. A., Kolmak R. V., Fedirko A. V., Seasonal variability of temperature fronts in the Black Sea by satellite data, *Issledovaniya Zemli iz kosmosa*, 2020, No. 1, pp. 52–69 (in Russian), DOI: 10.31857/S0205961420010030.
2. Belevich R. R., Orlova I. G., Features of the interannual variability of the hydrological and hydrochemical characteristics of waters on the northwestern shelf of the Black Sea in recent decades (60–90's), *Morskoi gidrofizicheskii zhurnal*, 1996, Vol. 2(III–IV), pp. 72–73 (in Russian).
3. Belokopytov V. N., Shokurova I. G., Estimation of temperature and salinity interdecadal variability in the Black Sea during time period 1951–1995, *Ekologicheskaya bezopasnost' pribrezhnoi i shel'fovoi zon i kompleksnoe ispol'zovanie resursov shel'fa*, 2005, No. 12, pp. 12–21 (in Russian).
4. Vorobyeva L. V., Nesterova D. A., Polishchuk L. N., Kulakova I. I., Sinegub I. A., Present state pelagic and benthic communities of the north-western Black Sea, *Vestnik Odesskogo natsional'nogo univrsiteta, Ser.: Geograficheskie i geologicheskie nauki*, 2014, Vol. 19, Vyp. 1, pp. 113–120 (in Russian).
5. Vostokov S. V., Lobkovskiy 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, Vol. 485, No. 1, pp. 293–297, DOI: 10.1134/S1028334X19030097.
6. Kyrylenko N. F., Evstigneev V. P., Chlorophyll a variability in the north-western Black Sea under the present climate conditions, *Monitoring systems of environment*, 2017, Vol. 4, pp. 80–87 (in Russian), <https://doi.org/10.33075/2220-5861-2017-4-80-87>.
7. Kovalyova I. V., Finenko Z. Z., Suslin V. V., Trends of long-term changes in the chlorophyll concentrations, primary production of phytoplankton and water temperature in the shelf regions of the Black Sea, *Sovremennye problemy distantsionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa*, 2021, Vol. 18, No. 4, pp. 228–235 (in Russian), DOI: 10.21046/2070-7401-2021-18-4-228-235.

8. Mikaelyan A. S., *Vremennaya dinamika fitoplanktona glubokovodnogo basseina Chornogo morya: Diss. dokt. biol. nauk* (Time dynamics of phytoplankton in the deep-water basin of the Black Sea, Dr. biol. sci. thesis), Moscow, 2018, 266 p.
9. Polonsky A. B., Variability of hydrological characteristics of the northwestern part of the Black Sea caused by large-scale processes, *Meteorologiya i gidrologiya*, 1997, Vol. 3, pp. 59–70 (in Russian).
10. Skripnik I. A., Kirsanova E. V., Primary production in the northwest Black Sea, *Naukovi zapiski Ternopil's'kogo peduniversitetu, Ser.: Biologiya, Spec. vip. "Gidroekologiya"*, 2001, Vol. 14, No. 3, pp. 158–160 (in Russian).
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, *Fundamentalnaya i prikladnaya gidrofizika*, 2018, Vol. 11, No. 3, pp. 64–72 (in Russian), DOI: 10.7868/S2073667318030085.
12. Finenko Z. Z., Churilova T. Ya., Parkhomenko A. V., Tugrul S., Photosynthetic characteristics of phytoplankton in the western Black Sea during the autumn bloom, *Morskoj ekologicheskij zhurnal*, 2008, Vol. 7, No. 4, pp. 75–84 (in Russian).
13. Shokurova I. G., Plastun T. V., Belokopytov V. N., Khaliulin A. H., Comparative analysis of the variability of hydrological characteristics of the waters of the northwestern shelf and the central part of the sea, *Ekologicheskaya bezopasnost' pribrezhnoi i shelfovoi zon i kompleksnye issledovaniya resursov shelfa*, Sevastopol: EKOSI-Gidrofizika, 2004, Issue 10, pp. 17–26 (in Russian).
14. Brewin R., Sathyendranath S., Hirata T., Lavender S. J., Barciela R. M., Hardman-Mountford N., A three-component model of phytoplankton size class for the Atlantic Ocean, *Ecological Modelling*, 2010, Vol. 221, pp. 1472–1483, DOI: 10.1016/j.ecolmodel.2010.02.014.
15. 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.
16. 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.
17. 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.
18. 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.
19. 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.
20. 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>.