

## Оценка долговременных изменений показателей продуктивности фитопланктона в шельфовой зоне северной и северо-восточной части Чёрного моря с использованием спутниковых данных

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

<sup>1</sup> *Институт биологии южных морей имени А. О. Ковалевского РАН  
Севастополь, 299011, Россия  
E-mail: ilonavk@ibss-ras.ru*

<sup>2</sup> *Морской гидрофизический институт РАН, Севастополь, 299011, Россия  
E-mail: slava.suslin@mhi-ras.ru*

Исследована среднегодовая и среднесезонная динамика биомассы и первичной продукции фитопланктона в поверхностном слое, а также интегральной первичной продукции в зоне фотосинтеза в северо-восточной и северной части Чёрного моря глубиной до 500 м за 1998–2020 гг. Для анализа использовались наблюдения со сканеров SeaWiFS (*англ.* Sea-Viewing Wide Field-of-View Sensor) и MODIS (*англ.* Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer) и модельные расчёты. Применялись модели, разработанные нами в предыдущих исследованиях. За 23-летний период в трёх районах вдоль российского побережья от Адлера до западной точки Крыма выявлены отрицательные статистически значимые тренды биомассы в поверхностном слое со снижением на 20–24 %, интегральной первичной продукции — на 18–19 %, первичной продукции в поверхностном слое — на 17–25 %. Уменьшение показателей фитопланктона происходило преимущественно за счёт тёплого сезона. Можно указать некоторое ступенчатое снижение общего уровня всех рассматриваемых параметров после 2012 г. Интегральная величина продуктивности отличается от величин в поверхностном слое больше, чем различаются между собой на поверхности показатели фитопланктона во времени, что может свидетельствовать о важности гидрологических и оптических условий в столбе воды. С 2012 г. расхождение в динамике показателей фитопланктона в трёх районах наблюдается преимущественно в холодный сезон. В тёплый сезон с 2015 г. различия в динамике трёх параметров в исследуемых акваториях слабо выражены. Среднегодовые значения имеют сходный характер.

**Ключевые слова:** данные спутниковых наблюдений, модельные расчёты, фитопланктон, биомасса, первичная продукция, многолетние тренды

Одобрена к печати: 28.11.2024

DOI: 10.21046/2070-7401-2025-22-1-192-204

### Введение

Первичная продукция фитопланктона, интегральная в столбе воды и в поверхностном слое, а также биомасса фитопланктона могут отражать экологическое состояние морской экосистемы. Прогнозы и оценки экологического состояния Чёрного моря проводятся разными способами. Мониторинг изменений в экосистеме моря может осуществляться с применением прямых измерений или данных спутниковых наблюдений, а также модельных построений, учитывающих различные параметры (Бондур и др., 2017; Стельмах, Мансурова, 2021; Часовников, Очередник, 2023; Часовников и др., 2016; Austen et al., 2018; Chen et al., 2013; Elliott et al., 2020; Fath et al., 2019; Solovjova, 2019, 2020). Оценки проводятся как для отдельных районов моря, так и более глобальные, для обширных акваторий (Кучейко и др., 2019; Петренко и др., 2015; Стельмах, Мансурова, 2021; Yunev et al., 2021). Особое внимание обычно уделяется шельфовой зоне в связи с экономической значимостью и большой антропогенной нагрузкой. Это влияние береговых стоков, производственных загрязнений, канализационных выбросов или аварий при транспортировке нефти через Чёрное море, данные наблюдений которых приводились в различных работах (Кузнецов, Кузнецова, 2021; Кучейко и др., 2019; Миронов, Муравьева, 2017; Петренко и др., 2015). Так, например, в отдельные

годы под Новороссийском, в Керченском поливе, в районе Одессы происходили разливы нефти и мазута с танкеров. Подобные происшествия создают особенно сильный стресс для экосистемы, пусть и в локальных зонах. Причиняется вред как водной среде, так и береговой линии. Оценки динамики показателей фитопланктонного сообщества могут отражать устойчивость экосистемы при внешних изменениях среды во времени (климатических изменениях, поступлении питательных веществ, загрязнениях), так как фитопланктон является первым трофическим звеном в водной экосистеме. Первичная продукция и биомасса автотрофов, в частности фитопланктона, отражают трофность водного объекта. Используя параметры фитопланктона, можно строить модели и прогнозировать состояние экосистемы под влиянием стрессовых факторов (Solovjova, 2019, 2020; Solovjova, Kovalyova, 2024). Ранее в публикациях (Ковалёва, Суслин, 2023; Ковалёва и др., 2021, 2022б; Финенко и др., 2022; Yunev et al., 2021) рассматривалась многолетняя динамика показателей фитопланктона для глубоководных и прибрежных районов. В данной работе нами рассмотрен более длительный временной интервал непрерывных наблюдений с использованием спутниковых данных и меньшие акватории для исследований. Выбранные районы охватывают шельф российского побережья Кавказа и Крыма, в котором находятся зоны с крупными портовыми городами и курортные зоны.

Цель работы — с помощью модельных расчётов и спутниковых наблюдений оценить многолетнюю, с 1998 по 2020 г., динамику первичной продукции фитопланктона, интегральной в поверхностном слое, а также биомассы фитопланктона в прибрежной зоне Чёрного моря вдоль кавказского и крымского побережья.

## Материалы и методы

Для проведения расчётов использовались входные параметры с оптических сканеров SeaWiFS (*англ.* Sea-Viewing Wide Field-of-View Sensor) на спутнике OrbView-2, MODIS (*англ.* Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer) на спутниках Aqua и Terra (<https://oceancolor.gsfc.nasa.gov/>). Данные со сканера SeaWiFS использовались за 1998–1999 гг., MODIS — 2000–2020 гг. (с разрешением  $1 \times 1$  км, данные второго уровня, обновление данных от 2022 г.). Расчёт концентрации хлорофилла проводился на основе алгоритма, разработанного для MODIS (Suslin, Churilova, 2016). Относительная ошибка алгоритма составляет ~30–40 % (Суслин и др., 2018). Ежесуточные входные данные со спутников и результаты расчёта концентрации хлорофилла были осреднены за двухнедельный период. Двухнедельный период выбирался как оптимальный временной интервал при отсутствии некоторых данных в связи с облачностью. В исследовании также проводилось среднесезонное и среднегодовое осреднение.

Для оценки биомассы фитопланктона  $B$  использовался алгоритм, описанный в работе (Финенко и др., 2018):

$$B = X_{л_0} / X_{л} : C,$$

где  $X_{л_0}$  — концентрация хлорофилла в поверхностном слое,  $\text{мг}/\text{м}^3$ . Для уравнения нахождения отношения концентрации хлорофилла к органическому углероду ( $X_{л}:C$ ) коэффициент детерминации  $r^2 = 0,78$  по данным расчётов и измерений. Подробно способ вычисления биомассы фитопланктона описывался в публикации (Ковалёва, Суслин, 2023).

Чистая суточная продукция фитопланктона  $P$  (в  $\text{мгС} \cdot \text{м}^{-3} \cdot \text{сут}^{-1}$ ) в поверхностном слое определялась по уравнению:

$$P = X_{л_0} P_m \text{th} \left( \frac{\alpha^B E_0}{P_m} \right),$$

где  $P_m$  — максимальная скорость фотосинтеза, нормированная на единицу хлорофилла,  $\text{мгС} \cdot \text{мгХл}^{-1} \cdot \text{сут}^{-1}$ ;  $\alpha^B$  — тангенс угла наклона кривой фотосинтез–свет, нормированный на концентрацию хлорофилла,  $\text{мгС} \cdot \text{мгХл}^{-1} \cdot \text{моль} \cdot \text{квантов}^{-1} \cdot \text{м}^{-2}$ ;  $E_0$  — фотосинтетически активная радиация на поверхности моря,  $\text{моль} \cdot \text{квантов} \cdot \text{м}^{-2} \cdot \text{сут}^{-1}$ . Подробно способ вычисления параметров модели описан ранее в работах (Ковалёва и др., 2021, 2022а).

Расчёт интегральной первичной продукции проводился по адаптированной для Чёрного моря модели Бехренфилда и Фальковского (Behrenfeld, Falkowski, 1997):

$$PP = P_{opt}^B \cdot DL \cdot X_{l_0} Z_{eu} \frac{0,66 E_0}{E_0 + 4,1},$$

где  $PP$  — чистая интегральная суточная первичная продукция,  $\text{мгС} \cdot \text{м}^{-2} \cdot \text{сут}^{-1}$ ;  $P_{opt}^B$  — максимальная часовая скорость фотосинтеза, нормированная на хлорофилл,  $\text{мгС} \cdot \text{мгХл}^{-1} \cdot \text{ч}^{-1}$ ;  $DL$  — длительность светового дня, ч;  $Z_{eu}$  — глубина эвфотической зоны, м. Суть адаптации и описание модели приведены в работе (Ковалёва, Суслин, 2022).

Статистическая обработка данных проводилась в пакетах программ Sigma Plot 12.5, Grapher, Excel. В качестве показателя статистической значимости тренда оценивался критерий Фишера. Так как проводилось осреднение по пространству и времени и исследуемые параметры варьировали в широком диапазоне в различные сезоны, нами принимался уровень значимости  $\alpha = 0,1$ .

Выбраны районы для исследования: 1 — российское побережье от Адлера до восточной границы Керченского пролива; 2 — от Керченского пролива до Ялты; 3 — от Ялты до западной точки Крыма (рис. 1). Для оценки параметров фитопланктона выделены районы с учётом влияния крупных портовых городов на российском побережье, Керченского пролива и условий шельфовой зоны южного берега Крыма, Севастопольского антициклона и северо-западного шельфа. Рассматривалась прибрежная зона до 500 м.

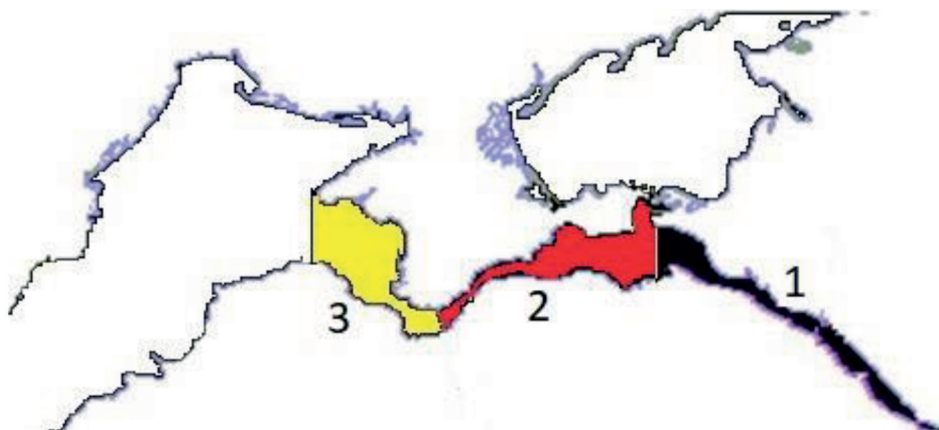


Рис. 1. Карта исследуемых районов Чёрного моря: 1 — северо-восточный район, 2 — центральный район, 3 — северо-западный район

## Результаты

Многолетние среднегодовые изменения первичной продукции в поверхностном слое, интегральной первичной продукции и биомассы фитопланктона в поверхностном слое для исследуемых районов (см. рис. 1) представлены на рис. 2 (см. с. 195). За 23 года изменчивость показателей имела сходный характер в трёх районах. Наиболее высокие значения всех рассматриваемых величин наблюдались в третьем районе, наиболее низкие — во втором. Для всех параметров в трёх исследуемых акваториях с 1998 по 2020 г. отмечен достоверный отрицательный тренд (при вероятности для различных параметров от  $p < 0,1$  до  $p < 0,0001$ ). В представленной многолетней динамике можно выделить два периода (см. рис. 2): первый — с 1998 по 2011 г., на котором статистически значимый тренд отсутствует, и второй — с 2012 по 2020 г., с общим снижением всех показателей фитопланктона. Однако отрицательные тренды за этот временной интервал (2012–2020) также не были статистически значимы. В данном случае можно говорить о некоторой фазе снижения общего уровня показателей фитопланктона в 2012–2014 гг. и дальнейших пониженных значениях.

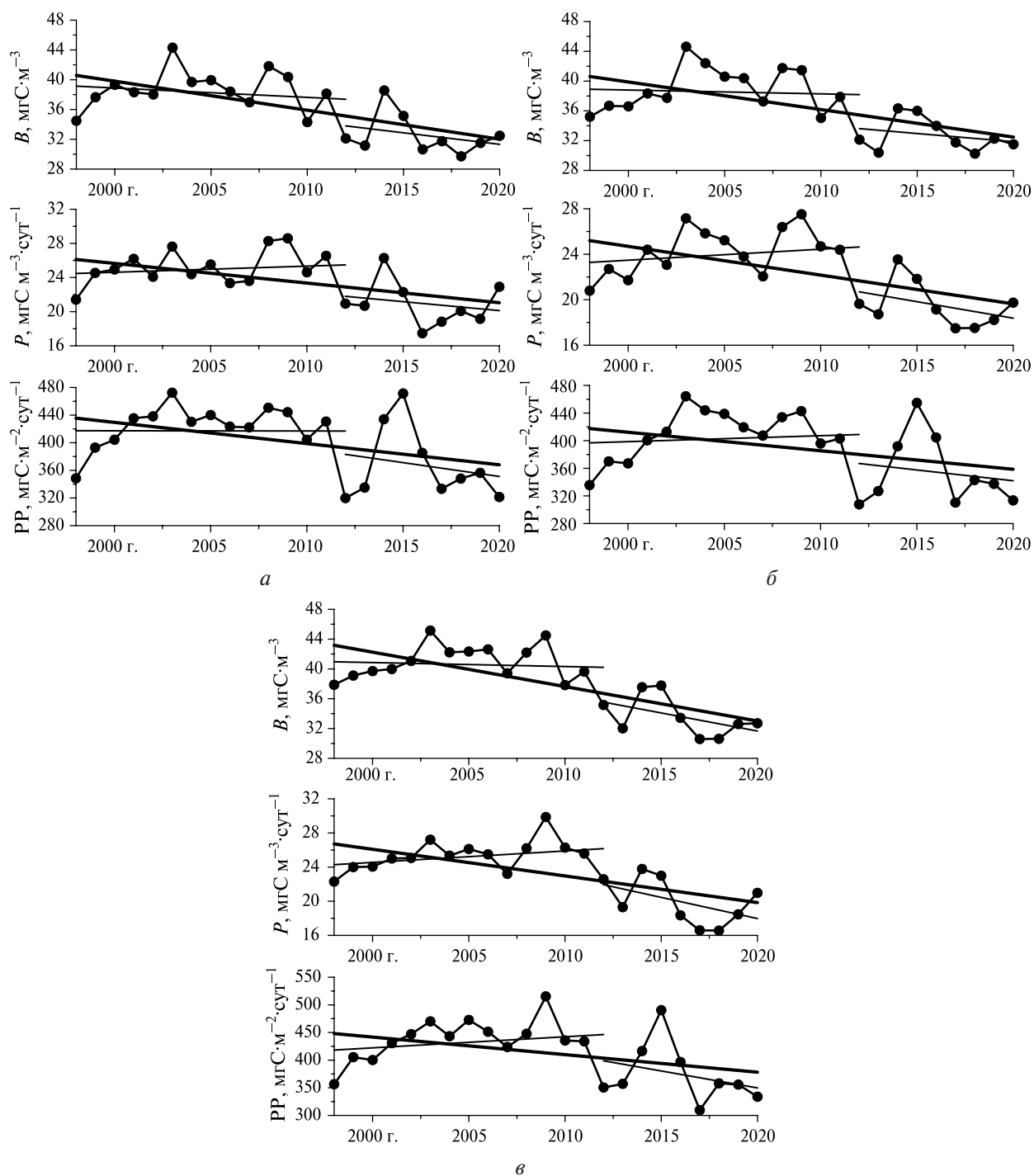


Рис. 2. Динамика среднегодовых значений биомассы фитопланктона ( $B$ ), интегральной первичной продукции (PP) и первичной продукции в поверхностном слое ( $P$ ) с 1998 по 2020 г. в первом (а), втором (б), третьем (в) районах прибрежной части Чёрного моря, а также тренды величин за весь временной интервал и за периоды с 1998 по 2011 г. и с 2012 по 2020 г.

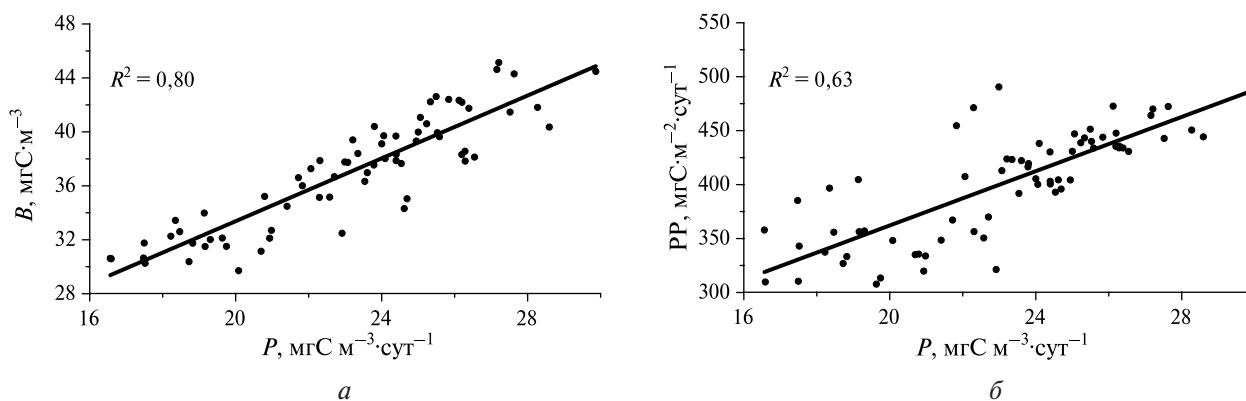
Достоверные тренды чётко выявляются за длительный период с 1998 по 2020 г. Анализ более коротких отрезков времени с 1998 или 2000 по 2008, 2010 г. статистически значимых трендов не выявил. Тренды отсутствуют и с 2015 по 2020 г., отмечен лишь более низкий уровень показателей фитопланктона в эти годы по сравнению со значениями до 2012 г. Поэтому мы можем рассматривать период 2012–2014 гг. как переходный, когда основные параметры фитопланктона снизились; сниженные значения сохранялись до 2020 г. при межгодовой вариабельности. Средние значения показателей фитопланктона в оба периода — 1998–2011

и 2012–2020 гг. — для трёх районов представлены в *таблице*, из которой очевидно общее снижение величин после 2012 г. Наиболее резкие отрицательные тренды были в третьем районе (*рис. 2в*). Несколько меньшее снижение всех показателей относительно изменений в других районах — во втором. В трёх выделенных акваториях отмечено снижение по отношению к первоначальному уровню биомассы фитопланктона на 20–24 %, интегральной первичной продукции — на 18–19 %, первичной продукции в поверхностном слое — на 17–25 % за 23-летний период.

Средние значения исследуемых показателей фитопланктона и их стандартного отклонения в два периода: 1998–2011 и 2012–2020 гг.

Годы	$B, \text{мгС}\cdot\text{м}^{-3}$	$P, \text{мгС}\cdot\text{м}^{-3}\cdot\text{сут}^{-1}$	$PP, \text{мгС}\cdot\text{м}^{-2}\cdot\text{сут}^{-1}$	Районы
1998–2011	$38,7\pm 2,6$	$25,3\pm 2,0$	$424,1\pm 29,8$	1
2012–2020	$32,6\pm 2,7$	$21,0\pm 2,6$	$367,0\pm 53,2$	
1998–2011	$39,0\pm 2,9$	$24,3\pm 2,1$	$409,7\pm 35,1$	2
2012–2020	$32,7\pm 2,2$	$19,5\pm 2,0$	$354,5\pm 51,2$	
1998–2011	$41,0\pm 2,3$	$25,4\pm 1,8$	$438,1\pm 37,2$	3
2012–2020	$33,6\pm 2,7$	$20,0\pm 2,7$	$374,3\pm 53,7$	

Различия в вариациях между первичной продукцией фитопланктона и биомассой в поверхностном слое менее выражены, чем между первичной продукцией в поверхностном слое и в столбе воды по результатам расчётов в трёх районах (*рис. 3*). Данное наблюдение может свидетельствовать о существенной роли различий в условиях среды для развития фитопланктона в поверхностном слое и в зоне фотосинтеза. Величина интегральной первичной продукции зависит от глубины зоны фотосинтеза, освещённости в столбе воды, наличия термоклина, конвективного перемешивания водных масс и поступления питательных веществ в эвфотический слой. Регрессионный анализ проводился по осреднённым данным для трёх акваторий в целом, так как для каждого из трёх районов результаты были близки.



*Рис. 3.* Регрессионный анализ для трёх районов: *а* — между первичной продукцией в поверхностном слое и биомассой фитопланктона; *б* — между первичной продукцией в поверхностном слое и интегральной в эвфотическом слое

За 9-летний, с 2012 по 2020 г., период изменений, в который наблюдалось общее снижение показателей фитопланктона, представлена сезонная изменчивость параметров фитопланктона в тёплый и холодный сезоны (тёплый — с апреля по октябрь, холодный — с ноября по март). Для трёх районов за указанный период отмечено уменьшение всех характеристик в тёплый период года (*рис. 4*, см. с. 197). В холодный период направленные тенденции менее выражены в исследуемых акваториях. В северо-восточном районе в среднем показате-



тели фитопланктона, особенно биомассы в холодный период, были ниже, чем в центральном и северо-западном. В районе Керченского пролива, наоборот, выше, что может обуславливаться особенностями гидрологических условий в рассматриваемых акваториях. В 2019 г. в холодный сезон отмечено повышение первичной продукции в северо-восточном районе в поверхностном слое, тогда как интегральные значения в этот год заметно возросли в центральном и северо-западном районах. В тёплый сезон за 9 лет заметных различий между показателями фитопланктона в трёх районах не выявлено, за исключением 2013 и 2014 гг.

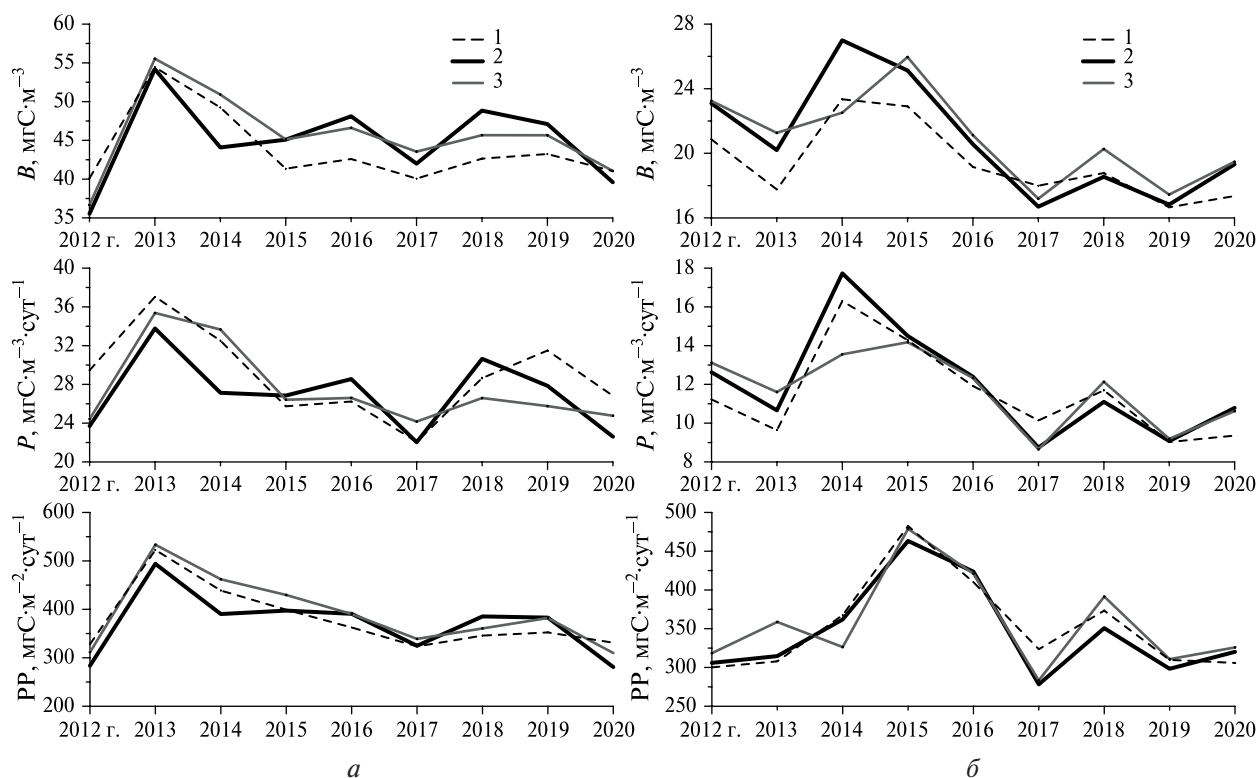


Рис. 4. Изменение показателей фитопланктона в холодный (ноябрь – март) (а) и тёплый (апрель – октябрь) (б) сезоны в трёх районах Чёрного моря с 2012 по 2020 г. 1, 2, 3 — номера районов, представленных на рис. 1

Можно отметить некоторое повышение всех показателей в оба сезона в 2018 г., в холодный сезон в 2013 г., а в 2019 г. — только в первом районе в холодный период года. В тёплый сезон в трёх районах увеличение показателей происходило в 2014 и 2015 гг. В целом в холодный сезон наблюдаются более высокая вариабельность между исследуемыми параметрами и более выраженные различия по районам за исследуемый период. Особенно чётко эта тенденция проявляется с 2015 г. Это может свидетельствовать о важной роли гидрологического режима и высокой подвижности вод в зимний период.

## Обсуждение

В предыдущих исследованиях первичной продукции в поверхностном слое в шельфовой зоне Чёрного моря (Ковалёва и др., 2021) за период с 1998 по 2015 г. статистически значимых направленных трендов выявлено не было, за исключением снижения её в летний период. Достоверное понижение среднегодовой первичной продукции в поверхностном слое за этот же период (1998–2015) наблюдалось только в глубоководной зоне (Ковалёва и др., 2022а). Для интегральной первичной продукции статистически значимое снижение отмечалось после 2008 г. в глубоководной области Чёрного моря (Ковалёва, Суслин, 2022). По результатам

нашего исследования за более длительный временной интервал (1998–2020) удалось выявить статистически значимое снижение биомассы фитопланктона и первичной продукции в поверхностном слое, а также интегральной первичной продукции в зоне фотосинтеза в прибрежной зоне северной и северо-восточной части моря. Уменьшение величин произошло с 2012 г. скорее ступенчато, чем непрерывно, из-за чего на более коротких временных интервалах достоверные тренды не выявляются. В целом можно выделить два периода среднегодовых показателей фитопланктона при высокой межгодовой вариабельности: первый — с 1998 по 2011 г. и второй — с 2012 по 2020 г., со снижением общего уровня исследуемых параметров на 13–21 % относительно средних значений в первый период. Анализ проведённых расчётов и трендов за 1998–2020 гг. показал понижение параметров фитопланктона преимущественно за счёт тёплого сезона года, что указывалось и в предыдущих работах (Ковалёва и др., 2021, 2022а, б). Это установлено и за более короткий временной интервал с 2012 по 2020 г. (см. рис. 4).

По результатам сопоставления параметров биомассы и первичной продукции фитопланктона в поверхностном слое и первичной продукции на поверхности и в зоне фотосинтеза (см. рис. 3) можно отметить важность различий в процессах на поверхности и в столбе воды и, соответственно, различий условий среды для развития фитопланктона. Это свидетельствует о том, что интегральные характеристики могут несколько иначе реагировать на перемены условий на поверхности и не всегда совпадать с характером изменений параметров фитопланктона на поверхности. Это связано с тем, что в столбе воды в разные периоды будет неодинаково меняться освещённость, коэффициент диффузного ослабления света водой, глубина зоны фотосинтеза и иные показатели, воздействующие на продуктивность фитопланктона.

На развитие фитопланктона из ряда физических и биологических факторов заметно влияет загрязнение водной среды, которое может приводить к поступлению как питательных веществ, стимулирующих рост водорослей, так и веществ, ингибирующих их рост и оказывающих токсическое действие. В работе (Стельмах, Мансурова, 2021) показано угнетающее воздействие комплексного загрязнения на рост водорослей в летний период, однако некоторые виды (относящиеся к динофитовым), по данным этих авторов, могут испытывать стимулирование в отдельных случаях. Загрязнение тяжёлыми металлами, такими как медь, что характерно для северной части Чёрного моря, угнетает рост диатомовых и динофитовых водорослей (Алатарцева и др., 2022). В 2014 г. в полевых исследованиях северо-восточной части моря (Часовников и др., 2016) отмечен рост комплексного загрязнения прибрежных вод с превышением норм предельно допустимой концентрации по свинцу в апреле и в июне. По результатам наших наблюдений (см. рис. 2) в северо-восточном районе отмечено снижение показателей фитопланктона с 2012 г. Однако из анализа средних за двухнедельный период данных в апреле–июне 2014 г. значения первичной продукции и биомассы фитопланктона снизились в 2–3 раза по сравнению с данными за эти же месяцы до 2011 г. в первом районе. Такое совпадение в апреле–июне в 2014 г. может быть связано с загрязнением в указанном случае. С 2012 г. особенно выражено уменьшение первичной продукции в поверхностном слое, в отдельные двухнедельные периоды до  $5 \text{ мгС} \cdot \text{м}^{-3} \cdot \text{сут}^{-1}$  в конце весны–начале лета. Несколько меньшее снижение было отмечено для интегральной продукции — до 1,5 раза. Подобный уровень уменьшения параметров фитопланктона в эти месяцы, по нашим данным, наблюдался до 2020 г. Это может свидетельствовать о перестройке фитопланктонного сообщества под действием различных факторов, повышении температуры воды в связи с глобальным потеплением (Ковалёва и др., 2021) и, предположительно, сохраняющихся тенденциях загрязнения этого района. Имеющиеся данные о серьёзных загрязнениях в прибрежной зоне исследуемых районов совпадают с выявленными нами изменениями в динамике показателей фитопланктона в отдельные периоды. По данным динамики нефтяного загрязнения, приведённым в литературных источниках (Кузнецов, Кузнецова, 2021; Петренко и др., 2015), выделен ноябрь 2007 г. и последующие зимние месяцы с высокой концентрацией углеводородов после крушения судов и разлива мазута в районе Керченского пролива. Во время этого шторма и аварии был нанесён существенный ущерб указанной акватории. Несколько

лет, до 2011 г., происходило самоочищение водной экосистемы (Кузнецов, Кузнецова, 2021; Петренко и др., 2015). Однако в дальнейшем наблюдался прирост нефтяного загрязнения с 2012 г. в районах Новороссийска и Керченского пролива, связанный уже с повышением антропогенной нагрузки (Кузнецов, Кузнецова, 2021). По данным различных исследований (Кузнецов, Кузнецова, 2021; Петренко и др., 2015; Часовников, Очередник, 2023; Часовников и др., 2016), в прибрежной зоне северо-восточной и северной части Чёрного моря сохраняется тенденция к повышению антропогенной нагрузки и, соответственно, комплексного и нефтяного загрязнения, что также наблюдается в прибрежной зоне Севастополя и на северо-западе Чёрного моря (Мионов, Муравьёва, 2017; Петренко и др., 2015). В некоторых пределах стрессового воздействия экосистема способна к самоочищению и восстановлению, гидробионты и фитопланктон в этом играют ключевую роль. По результатам наших исследований с 2012 г. отмечено снижение основных параметров фитопланктона — биомассы и первичной продукции в поверхностном слое, а также интегральной первичной продукции. В декабре 2007 г., например, существенно (примерно на 30 %) снизились рассматриваемые нами параметры, единственный раз в этом месяце за 23 года в этом районе, затем восстановились, что возможно было связано с сильным нефтяным загрязнением после аварии. Тенденции к общему снижению показателей фитопланктона за последние десять лет обусловлены различными факторами. Это и повышение температуры воды в связи с глобальным потеплением (Ковалёва и др., 2021, 2022а), и рост антропогенной нагрузки и загрязнения. В комплексе факторы усиливают друг друга и повышают стрессовые условия. Ранее сообщалось о некоторой перестройке фитопланктонного сообщества в Чёрном море примерно с 2010-х гг. (Воробьёва и др., 2014; Микаэлян, 2018; Стельмах, 2017; Stelmakh et al., 2023). На данном этапе экосистема сохраняет относительную стабильность, несмотря на отдельные тенденции к снижению показателей фитопланктона. Дальнейшие наблюдения параметров фитопланктона важны для оценки состояния экосистемы моря и последующей разработки моделей экологических рисков и прогнозов.

## Заключение

С использованием данных спутниковых наблюдений проведены расчёты параметров фитопланктона — интегральной первичной продукции, первичной продукции и биомассы фитопланктона в поверхностном слое за многолетний период с 1998 по 2020 г. Отмечены достоверные тенденции к снижению указанных показателей в прибрежной зоне северо-восточной и северной части Чёрного моря в диапазоне от 17 до 25 % за 23-летний период. За более короткие временные отрезки статистически значимых трендов не наблюдается. Можно говорить об общем понижении уровня показателей фитопланктона после 2011 г. В особенности снижение выражено в тёплый период года — с апреля по октябрь. Данные изменения могут быть связаны с разными факторами: отчасти с повышением температуры воды в связи с глобальным потеплением, отчасти с антропогенной нагрузкой. Параметры фитопланктона в поверхностном и эвфотическом слое могут различаться между собой более заметно, что связано с разницей между процессами и условиями на поверхности и в столбе воды. В трёх районах прибрежной зоны с разными гидрологическими условиями среднемноголетняя динамика показателей фитопланктона была примерно схожей. Более выраженные различия в изменчивости показателей в трёх районах наблюдались в холодный сезон, по сравнению с тёплым, за 2012–2020 гг. Уровень показателей фитопланктона в районе западного побережья Крыма и Севастопольского антициклона выше, чем в районе северо-восточной части российского побережья, Керченского пролива и южного берега Крыма на глубинах до 500 м. Намечившиеся общие тенденции снижения показателей фитопланктона требуют дальнейших наблюдений.

Работа выполнена в рамках государственного задания Института биологии южных морей имени А. О. Ковалевского РАН по теме «Трансформация структуры и функций эко-



систем морской пелагиали в условиях антропогенного воздействия и изменений климата» № 124030400057-4 и FNNN-2024-0012 «Анализ, диагноз и оперативный прогноз состояния гидрофизических и гидрохимических полей морских акваторий на основе математического моделирования с использованием данных дистанционных и контактных методов измерений».

## Литература

1. Алатарцева О. С., Стельмах Л. В., Сагадатова Р. Р. Использование ростовых и флуоресцентных показателей для оценки токсического воздействия ионов меди на морские микроводоросли // Системы контроля окружающей среды. 2022. Т. 50. № 4. С. 78–86. <https://doi.org/10.33075/2220-5861-2022-4-78-86>.
2. Бондур В. Г., Воробьев В. Е., Замшин В. В. и др. Мониторинг антропогенных воздействий на прибрежные акватории Черного моря по многоспектральным космическим изображениям // Исслед. Земли из космоса. 2017. № 6. С. 3–22. <https://doi.org/10.7868/S020596141706001X>.
3. Воробьева Л. В., Нестерова Д. А., Полищук Л. Н., Кулакова И. И., Синегуб И. А. Современное состояние пелагических и донных сообществ северо-западной части Чёрного моря // Вестн. ОНУ. Сер.: Геогр. и геолог. науки. 2014. Т. 19. Вып. 1. С. 113–120.
4. Ковалёва И. В., Суслин В. В. Интегральная первичная продукция в глубоководных районах Черного моря в 1998–2015 годах // Морской гидрофиз. журн. 2022. Т. 38. № 4. С. 432–445. <https://doi.org/10.22449/0233-7584-2022-4-432-445>.
5. Ковалёва И. В., Суслин В. В. Сезонная изменчивость биомассы и удельной скорости роста фитопланктона в 2016–2020 годах в глубоководной зоне Чёрного моря // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2023. Т. 20. № 4. С. 250–262. DOI: 10.21046/2070-2023-20-4-250-262.
6. 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.
7. Ковалёва И. В., Финенко З. З., Суслин В. В. (2022a) Тренды изменения первичной продукции фитопланктона по данным дистанционного зондирования в глубоководной области Чёрного моря в 1998–2015 годы // Фундам. и приклад. гидрофизика. 2022. Т. 15. № 4. С. 42–53. <https://doi.org/10.48612/fpg/dfbm-t6da-5rvb>.
8. Ковалёва И. В., Финенко З. З., Суслин В. В. (2022b) Тренды многолетних изменений первичной продукции фитопланктона совместно с концентрацией хлорофилла и температурой воды в шельфовых районах северо-западной части Чёрного моря // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2022. Т. 19. № 4. С. 239–248. DOI: 10.21046/2070-7401-2022-19-4-239-248.
9. Кузнецов А. Н., Кузнецова Е. В. Нефтяное загрязнение побережья Черного моря в районе города Новороссийска и Керченского пролива: многолетняя динамика и оценка способности к самоочищению // Океанологические исследования. 2021. Т. 49. № 1. С. 142–162. DOI: 10.29006/1564-2291.JOR-2021.49(1).7.
10. Кучейко А. А., Иванов А. Ю., Григорьев Н. С. и др. Канализационные выбросы в прибрежной зоне Чёрного моря: наблюдение и дистанционный контроль из космоса // Экология и промышленность России. 2019. Т. 23. № 12. С. 54–60. DOI: 10.18412/1816-0395-2019-12-54-60.
11. Микаэлян А. С. Временная динамика фитопланктона глубоководного бассейна Чёрного моря: дис. ... д-ра биол. наук. Москва, 2018. 266 с.
12. Миронов О. А., Муравьева И. П. Нефтяные углеводороды и общие липиды в береговых выбросах *Cystoseira barbata* (Stackh.) C. Agardh в прибрежной зоне Севастополя (Чёрное море) // Морской биол. журн. 2017. Т. 2. № 2. С. 49–54. DOI: 10.21072/mbj.2017.02.2.05.
13. Петренко О. А., Жугайло С. С., Авдеева Т. М. Результаты многолетних исследований уровня загрязнения морской среды азово-черноморского рыбохозяйственного бассейна // Тр. ЮгНИРО. 2015. Т. 53. С. 4–18.
14. Стельмах Л. В. Закономерности роста фитопланктона и его потребление микрзоопланктоном в Черном море: дис. ... д-ра биол. наук. Севастополь, 2017. 310 с.
15. Стельмах Л. В., Мансурова И. М. Функциональное состояние культур морских микроводорослей как показатель уровня загрязнения вод Севастопольской бухты // Системы контроля окружающей среды. 2021. Т. 46. № 4. С. 83–90. DOI: 10.33075/2220-5861-2021-4-83-90.
16. Суслин В. В., Чурилова Т. Я., Ли М. Е. и др. Концентрация хлорофилла *a* в Чёрном море: Сравнение спутниковых алгоритмов // Фундам. и приклад. гидрофизика. 2018. Т. 11. № 3. С. 64–72. DOI: 10.7868/S2073667318030085.

17. Финенко З. З., Ковалева И. В., Суслин В. В. Новый подход к оценке биомассы фитопланктона и ее вариабельности в поверхностном слое Черного моря по спутниковым данным // Успехи современной биологии. 2018. Т. 138. № 3. С. 294–307. DOI: 10.7868/S0042132418030079.
18. Финенко З. З., Мансурова И. М., Суслин В. В. Временная динамика биомассы фитопланктона в поверхностном слое Черного моря по данным спутниковых наблюдений // Океанология. 2022. Т. 62. № 3. С. 416–427. DOI: 10.31857/S0030157422030042.
19. Часовников В. К., Очередник О. А. Мониторинг загрязнения прибрежной зоны Чёрного моря // Экология гидросферы. 2023. Т. 9. № 1. С. 46–56. DOI: 10.33624/2587-9367-20230-1(9)-46-56.
20. Часовников В. К., Чжу В. П., Очередник О. А. и др. Оценка уровня техногенных загрязнений в прибрежной зоне Чёрного моря в районе Геленджика // Океанология. 2016. Т. 56. № 1. С. 76–80. DOI: 10.7868/S0030157416010020.
21. Austen M. C., Crowe T. P., Elliott M. et al. Vectors of change in the marine environment: Ecosystem and economic impacts and management implications // Estuarine, Coastal and Shelf Science. 2018. V. 201. P. 1–6. DOI: 10.1016/j.ecss.2018.01.009.
22. Behrenfeld M., Falkowski P. A consumer's guide to phytoplankton primary productivity models // Limnology and Oceanography. 1997. V. 42. Iss. 7. P. 1479–1491.
23. Chen S. Q., Chen B., Fath B. D. Ecological risk assessment on the system scale: A review of state-of-the-art models future perspectives // Ecological Modelling. 2013. V. 250. P. 25–33. DOI: 10.1016/j.ecolmodel.2012.10.015.
24. Elliott M., Borja A., Cormier R. Activity-footprints, pressures-footprints and effects-footprints — walking the pathway to determining and managing human impacts in the sea // Marine Pollution Bull. 2020. V. 155. Article 111201. DOI: 10.1016/j.marpolbul.2020.111201.
25. Fath B. D., Asmus H., Asmus R. et al. Ecological network analysis metrics: The need for an entire ecosystem approach in management and policy // Ocean and Coastal Management. 2019. V. 174. P. 1–14. DOI: 10.1016/j.ocecoaman.2019.03.007.
26. Solovjova N. V. Ecological risk modelling in developing resources of ecosystems characterized by varying vulnerability levels // Ecological Modelling. 2019. No. 406. P. 60–72. DOI: 10.1016/j.ecolmodel.2019.05.015.
27. Solovjova N. V. Risk assessment simulation for shelf ecosystems based on the ecoscreening and dynamic methods synthesis // Estuarine, Coastal and Shelf Science. 2020. V. 243. Article 106881. DOI: 10.1016/j.ecss.2020.106881.
28. Solovjova N. V., Kovalyova I. V. Simulation-based ecological risk assessment of the Black Sea ecosystem // Oceanology. 2024. V. 64. No. 1. P. 27–36. <https://doi.org/10.1134/S0001437024010119>.
29. Stelmakh L., Kovrigina N., Gorbunova T. Phytoplankton seasonal dynamics under conditions of climate change and anthropogenic pollution in the western coastal waters of the Black Sea (Sevastopol Region) // J. Marine Science and Engineering. 2023. V. 11. Iss. 3. Article 569. 14 p. <https://doi.org/10.3390/jmse11030569>.
30. Suslin V., Churilova T. A 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. V. 37. No. 18. P. 4380–4400, DOI: 10.1080/01431161.2016.1211350.
31. Yunev O. A., Carstensen J., Stelmakh L. V. et al. Reconsideration of the phytoplankton seasonality in the open Black Sea // Limnology and Oceanography Letters. 2021. V. 6. Iss. 1. P. 51–59. <https://doi.org/10.1002/lol2.10178>.

## Assessment of long-term changes in phytoplankton productivity indicators in the shelf zone of the northern and northeastern Black Sea using satellite data

I. V. Kovalyova<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  
E-mail: [ilonavk@ibss-ras.ru](mailto:ilonavk@ibss-ras.ru)

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

The average annual and average seasonal dynamics of phytoplankton biomass and primary phytoplankton production in the surface layer as well as integrated primary production in the photosynthesis zone for 1998–2020 have been studied in the regions of the northeastern and northern Black Sea up to 500 m deep. Observations from SeaWiFS (Sea-Viewing Wide Field-of-View Sensor) and MODIS (Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer) scanners and model calculations were used for the analysis. The models developed by us in previous studies were used. Over the 23-year period, in three regions along the Russian coast from Adler to the western point of Crimea negative statistically significant trends were revealed for biomass in the surface layer with a decrease by 20–24 %, integral primary production by 18–19 %, primary production in the surface layer by 17–25 %. The decrease in phytoplankton indicators was mainly due to the warm season. It is possible to indicate some gradual decrease in the overall level of all the parameters under consideration after 2012. The integral value of productivity differs from the values in the surface layer somewhat more than the surface phytoplankton indicators differ from each other, this may indicate the importance of hydrological and optical conditions in the water column. Since 2012, differences in the dynamics of phytoplankton indicators in the three regions have been observed mainly during the cold season. In the warm season since 2015, the differences in the dynamics of the three parameters in the studied waters have been poorly expressed. The average annual values are similar in nature.

**Keywords:** satellite observation data, model calculations, phytoplankton, biomass, primary products, long-term trends

Accepted: 28.11.2024

DOI: 10.21046/2070-7401-2025-22-1-192-204

### References

1. Alartartseva O. S., Stelmakh L. V., Sagadatova R. R., The use of growth and fluorescent indicators to assess the toxic effect of copper ions on marine microalgae, *Monitoring systems of environment*, 2022, V. 50, No. 4, pp. 78–86 (in Russian), <https://doi.org/10.33075/2220-5861-2022-4-78-86>.
2. Bondur V. G., Vorobyov V. E., Zamshin V. V. et al., Monitoring of anthropogenic impacts on the coastal waters of the Black Sea using multispectral space images, *Issledovanie Zemli iz kosmosa*, 2017, No. 6, pp. 3–22 (in Russian), DOI: <https://doi.org/10.7868/S020596141706001X>.
3. Vorobyova L. V., Nesterova D. A., Polishchuk L. N., Kulakova I. I., Sinegub I. A., The current state of pelagic and bottom communities in the northwestern part of the Black Sea, *Vestnik Odesskogo natsional'nogo universiteta. Ser.: Geographicheskie i geologicheskie nauki*, 2014, V. 19, Iss. 1, pp. 113–120 (in Russian).
4. Kovalyova I. V., Suslin V. V., Integrated primary production in the deep-sea regions of the Black Sea in 1998–2015, *Physical Oceanography*, 2022, V. 29, Iss. 4, pp. 404–416, <https://doi.org/10.22449/1573-160X-2022-4-404-416>.
5. Kovalyova I. V., Suslin V. V., Seasonal variability of biomass and specific growth rate of phytoplankton for 2016–2020 in the deep-water zone of the Black Sea, *Sovremennye problemy distantsionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa*, 2023, V. 20, No. 4, pp. 250–262 (in Russian), DOI: 10.21046/2070-7401-2023-20-4-250-262.
6. 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, V. 18, No. 4, pp. 228–235 (in Russian), DOI: 10.21046/2070-7401-2021-18-4-228-235.
7. Kovaleva I. V., Finenko Z. Z., Suslin V. V. (2022a), 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, V. 15, No. 4, pp. 42–53 (in Russian), <https://doi.org/10.48612/fpg/dfbm-t6da-5rvb>.
  8. Kovalyova I. V., Finenko Z. Z., Suslin V. V. (2022b), Trends of long-term changes in the primary production of phytoplankton, chlorophyll concentration and water temperature in the shelf regions of the north-west Black Sea, *Sovremennye problemy distantsionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa*, 2022, V. 19, No. 4, pp. 239–248 (in Russian), DOI: 10.21046/2070-7401-2022-19-4-239-248.
  9. Kuznetsov A. N., Kuznetsova E. V., Oil pollution of the Black Sea coast near the areas of the Tsemes bay and the Kerch strait: Long-term dynamics and assessment of self-cleaning capacity, *J. Oceanological Research*, 2021, V. 49, No. 1, pp. 142–162 (in Russian), DOI: 10.29006/1564-2291.JOR-2021.49(1).7.
  10. Kucheiko A. A., Ivanov A. Yu., Grigoriev N. S. et al., Sewer discharges in the coastal zone of the Black Sea: Observation and monitoring from space, *Ecology and Industry of Russia*, 2019, V. 23, No. 12, pp. 54–60 (in Russian), DOI: 10.18412/1816-0395-2019-12-54-60.
  11. Mikaelyan A. S., *Vremennaya dinamika fitoplanktona glubokovodnogo basseina Chernogo 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. (in Russian).
  12. Mironov O. A., Muraviova I. P., Oil hydrocarbons and total lipids in the coastal casts of *Cystoseira barbata* (Stackh.) C. Agardh in the littoral zone of Sevastopol (Black Sea), *Marine Biological J.*, 2017, V. 2, No. 2, pp. 49–54 (in Russian), DOI: 10.21072/mbj.2017.02.2.05.
  13. Petrenko A., Zhugailo S. S., Avdeeva T. M., Results of long-term investigations on the contamination level in the Azov and Black Seas fishery basin marine environment, *Trudy YugNIRO*, 2015, V. 53, pp. 4–18 (in Russian).
  14. Stelmakh L. V., *Zakonomernosti rosta fitoplanktona i ego potreblenie mikrozooplanktonom v Chernom more: Diss. dokt. biol. nauk* (Patterns of phytoplankton growth and its consumption by microzooplankton in the Black Sea, Dr. biol. sci. thesis), Sevastopol, 2017, 310 p. (in Russian).
  15. Stelmakh L. V., Mansurova I. M., Functional state of the marine microalgae cultures as an indicator of the water pollution level of the Sevastopol Bay, *Sistemy kontrolya okruzhayushchei sredy*, 2021, V. 46, No. 4, pp. 83–90 (in Russian), DOI: 10.33075/2220-5861-2021-4-83-90.
  16. Suslin V. V., Churilova T. Ya., Li M. E. et al., Comparison of the Black Sea chlorophyll-a algorithms for seaWiFS and MODIS instruments, *Fundamental and Applied Hydrophysics*, 2018, V. 11, No. 3, pp. 64–72 (in Russian), DOI: 10.7868/S2073667318030085.
  17. Finenko Z. Z., Kovalyova I. V., Suslin V. V., A new approach to estimate phytoplankton biomass and its variability in the Black Sea surface water layer based on satellite data, *Uspekhi sovremennoi biologii*, 2018, V. 138, No. 3, pp. 294–307 (in Russian), DOI: 10.7868/S0042132418030079.
  18. Finenko Z. Z., Mansurova I. M., Suslin V. V., Temporal dynamics of phytoplankton biomass in the surface layer of the Black Sea according to satellite observations, *Oceanology*, 2022, V. 62, No. 3, pp. 358–368, DOI: 10.1134/S0001437022030043.
  19. Chasovnikov V. K., Ocherednik O. A., Monitoring of pollution of the Black Sea coastal zone, *Hydrosphere Ecology*, 2023, V. 9, No. 1, pp. 46–56, DOI: 10.33624/2587-9367-20230-1(9)-46-56.
  20. Chasovnikov V. K., Chjoo V. P., Ocherednik O. A. et al., Evaluation of the level of technogenic pollution in the coastal zone of the Black Sea near Gelendzhik, *Oceanology*, 2016, V. 56, Iss. 1, pp. 70–74, <https://doi.org/10.1134/S0001437016010021>.
  21. Austen M. C., Crowe T. P., Elliott M. et al., Vectors of change in the marine environment: Ecosystem and economic impacts and management implications, *Estuarine, Coastal and Shelf Science*, 2018, V. 201, pp. 1–6, DOI: 10.1016/j.ecss.2018.01.009.
  22. Behrenfeld M., Falkowski P., A consumer's guide to phytoplankton primary productivity models, *Limnology and Oceanography*, 1997, V. 42, Iss. 7, pp. 1479–1491.
  23. Chen S. Q., Chen B., Fath B. D., Ecological risk assessment on the system scale: A review of state-of-the-art models future perspectives, *Ecological Modelling*, 2013, V. 250, pp. 25–33, DOI: 10.1016/j.ecolmodel.2012.10.015.
  24. Elliott M., Borja A., Cormier R., Activity-footprints, pressures-footprints and effects-footprints — walking the pathway to determining and managing human impacts in the sea, *Marine Pollution Bull.*, 2020, V. 155, Article 11201, DOI: 10.1016/j.marpolbul.2020.11201.
  25. Fath B. D., Asmus H., Asmus R. et al., Ecological network analysis metrics: The need for an entire ecosystem approach in management and policy, *Ocean and Coastal Management*, 2019, V. 174, pp. 1–14, DOI: 10.1016/j.ocecoaman.2019.03.007.
  26. Solovjova N. V., Ecological risk modelling in developing resources of ecosystems characterized by varying vulnerability levels, *Ecological Modelling*, 2019, No. 406, pp. 60–72, DOI: 10.1016/j.ecolmodel.2019.05.015.



27. Solovjova N. V., Risk assessment simulation for shelf ecosystems based on the ecoscreening and dynamic methods synthesis, *Estuarine, Coastal and Shelf Science*, 2020, V. 243, Article 106881, DOI: 10.1016/j.ecss.2020.106881.
28. Solovjova N. V., Kovalyova I. V., Simulation-based ecological risk assessment of the Black Sea ecosystem, *Oceanology*, 2024, V. 64, No. 1, pp. 27–36, <https://doi.org/10.1134/S0001437024010119>.
29. Stelmakh L., Kovrigina N., Gorbunova T., Phytoplankton seasonal dynamics under conditions of climate change and anthropogenic pollution in the western coastal waters of the Black Sea (Sevastopol Region), *J. Marine Science and Engineering*, 2023, V. 11, Iss. 3, Article 569, 14 p., <https://doi.org/10.3390/jmse11030569>.
30. Suslin V., Churilova T., A 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, V. 37, No. 18, pp. 4380–4400, DOI: 10.1080/01431161.2016.1211350.
31. Yunev O.A., Carstensen J., Stelmakh L.V. et al., Reconsideration of the phytoplankton seasonality in the open Black Sea, *Limnology and Oceanography Letters*, 2021, V. 6, Iss. 1, pp. 51–59, <https://doi.org/10.1002/lol2.10178>.