

Экологическое состояние вод Севастопольского взморья (Западный Крым) и его влияние на динамику планктонных сообществ

**Н. В. Поспелова *, С. В. Щуров, Н. П. Ковригина,
Е. В. Лисицкая, О. А. Трощенко**

Институт биологии южных морей имени А. О. Ковалевского РАН, Севастополь, Россия

** e-mail: nvpospelova@ibss-ras.ru*

Аннотация

Севастопольское взморье испытывает постоянное воздействие антропогенных и природных факторов, которое может усиливаться в закрытых бухтах. Цель работы – проанализировать пространственно-временную изменчивость гидролого-гидрохимических параметров и состояние планктонных сообществ Севастопольского взморья в современный период. Исследования изменчивости гидрохимических показателей вод, фитопланктона и меропланктона проведены в 2020–2022 гг. в бухтах Камышовой, Казачьей, Круглой, Стрелецкой, Севастопольской и Карантинной. Гидрохимические показатели (соленость, биохимическое потребление кислорода за пять суток (БПК₅), перманганатная окисляемость, содержание кремния, минеральных и органических форм азота и фосфора) определяли по общепринятым методикам. Для определения лимитирующего биогенного фактора использовали стехиометрические соотношения Редфилда. Определяли видовой состав, численность и биомассу фитопланктона и меропланктона. За 20 лет на взморье Севастополя отмечено повышение уровня загрязнения поверхностных вод (БПК₅ и окисляемость превышали предельно допустимые значения). Биогенные элементы (соединения азота, фосфора, кремния) изменялись в широких пределах. Лимитирующим фактором для развития фитопланктона в весенний период был азот, летом – кремний, летом и осенью – фосфор. За период исследования не зафиксировано случаев «цветения» фитопланктона. Массовое развитие диатомовых водорослей и кокколитофорид отмечено в весенний период. Летом и осенью численность и биомасса планктонных микроводорослей снижались до минимальных значений. Отмечена относительная синхронность сезонной динамики плотности меропланктона: во всех бухтах Севастополя минимальные значения зарегистрированы в холодный период года, максимальные – в теплый период при прогреве воды выше 14.5 °C. Сравнительный анализ и количественные оценки динамики планктона в бухтах, различающихся по гидрологическим и гидрохимическим параметрам среды, могут внести вклад в оценку функциональной реакции прибрежных экосистем Черного моря на антропогенные и природные факторы.

© Поспелова Н. В., Щуров С. В., Ковригина Н. П., Лисицкая Е. В.,
Трощенко О. А., 2025



Контент доступен по лицензии Creative Commons Attribution-Non Commercial 4.0
International (CC BY-NC 4.0)
This work is licensed under a Creative Commons Attribution-Non Commercial 4.0
International (CC BY-NC 4.0) License

Ключевые слова: фитопланктон, меропланктон, биогенные элементы, биохимическое потребление кислорода, БПК₅, Черное море

Благодарности: работа выполнена по теме государственного задания ФИЦ ИнБЮМ (№ 124022400152-1).

Для цитирования: Экологическое состояние вод Севастопольского взморья (Западный Крым) и его влияние на динамику планктонных сообществ / Н. В. Поспелова [и др.] // Экологическая безопасность прибрежной и шельфовой зон моря. 2025. № 2. С. 118–134. EDN JDOMVD.

Ecological State of Waters of the Sevastopol Seashore (Western Crimea) and its Influence on the Dynamics of Plankton Communities

**N. V. Pospelova *, S. V. Shchurov, N. P. Kovrigina, E. V. Lisitskaya,
O. A. Troshchenko**

*A. O. Kovalevsky Institute of Biology of the Southern Seas of Russian Academy of Sciences,
Sevastopol, Russia*

** e-mail: nvpospelova@ibss-ras.ru*

Abstract

The Sevastopol seashore is influenced by a variety of anthropogenic and natural factors, which can be particularly pronounced in enclosed bays. The objective of this study is to analyse the spatial and temporal variability of hydrological and hydrochemical parameters and the modern state of plankton communities of the Sevastopol seashore. The variability of hydrochemical indicators of water, phytoplankton and meroplankton was studied in 2020–2022 in Kamyshevaya, Kazachya, Kruglaya, Streletskaya, Sevastopol and Karantinnaya Bays. The hydrochemical parameters (salinity, biochemical oxygen demand over five days (BOD₅), permanganate index, silicon content, mineral and organic forms of nitrogen and phosphorus) were determined according to generally accepted methods. The Redfield stoichiometric ratios were applied in order to ascertain the limiting nutrient factor. The species composition, abundance and biomass of phytoplankton and meroplankton were determined. In comparison to data collected 20 years ago, an increase in surface water pollution (BOD₅ and permanganate index exceeding maximum permissible values) was observed on the seashore of Sevastopol. Biogenic elements (nitrogen, phosphorus, and silicon compounds) varied widely. The study found that limiting factor for phytoplankton vegetation was nitrogen in spring, silicon in summer, and phosphorus in summer and autumn. No phytoplankton blooms were recorded during the study period. Mass development of diatoms and coccolithophores was observed in spring. In summer and autumn, the abundance and biomass of planktonic microalgae decreased to minimum values. Relative synchrony of seasonal dynamics of meroplankton density was observed: in all Sevastopol bays minimum values were registered in the cold period of the year, whereas maximum values were recorded in the warm period when the water warmed up above 14.5 °C. Comparative analyses and quantitative assessments of plankton dynamics in bays, differing in hydrological and hydrochemical environmental parameters, can contribute to the assessment of the functional response of Black Sea coastal ecosystems to anthropogenic and natural factors.

Keywords: phytoplankton, meroplankton, nutrients, biochemical oxygen demand over five days, BOD₅, Black Sea

Acknowledgments: This work was carried out under state assignment of the A.O. Kovalevsky Institute of Biology of the Southern Seas of RAS (124022400152-1).

For citation: Pospelova, N.V., Shchurov, S.V., Kovrigina, N.P., Lisitskaya, E.V. and Troshchenko, O.A., 2025. Ecological State of Waters of the Sevastopol Seashore (Western Crimea) and its Influence on the Dynamics of Plankton Communities. *Ecological Safety of Coastal and Shelf Zones of Sea*, (2), pp. 118–134.

Введение

Основой пелагических пищевых цепей в водных системах является фитопланктон, на динамику численности, видовое разнообразие и продуктивность которого влияют различные факторы окружающей среды. В связи с этим структурные и функциональные параметры фитопланктона могут служить индикаторами изменений в экосистемах бухт. Одним из звеньев трофической цепи в экосистеме пелагиали является меропланктон (пелагические личинки донных беспозвоночных). С одной стороны, личинки потребляют большое количество фитопланктона, с другой – они сами входят в состав пищи многих морских беспозвоночных и рыб. При этом меропланктон наиболее уязвим для воздействия различного рода токсикантов и хозяйственно-бытовых стоков [1].

Севастопольское взморье испытывает значительное воздействие антропогенных факторов, которое может усиливаться в закрытых бухтах [2, 3]. Бухты имеют различную конфигурацию, размеры и глубину. Большинство из них вытянуты и вдаются глубоко в берег (Севастопольская, Карантинная, Стрелецкая, Камышовая и Казачья), исключение составляет б. Круглая [4]. На формирование гидрохимического режима Севастопольского взморья оказывают влияние речной, хозяйственно-бытовой и ливневый стоки с высоким содержанием минерального азота, превышающим на один – три порядка содержание соединений фосфора и определяющим эвтрофирование водоемов [2]. Влияние речного стока и антропогенного загрязнения возрастает с запада на восток. Наиболее неблагоприятной является б. Карантинная, наименее – б. Казачья. В то же время исследования, выполненные в отдельных бухтах Севастопольского взморья в последние годы, свидетельствуют о появлении новых очагов антропогенного загрязнения и существенном увеличении содержания общего взвешенного и растворенного органического вещества и нефтяных углеводородов, которое часто превышало предельно допустимую концентрацию (ПДК) [5–7].

Цель работы – проанализировать пространственно-временную изменчивость гидролого-гидрохимических параметров и состояние планктонных сообществ Севастопольского взморья по данным 2020–2022 гг.

Материалы и методы

Исследования проведены с октября 2020 по ноябрь 2022 г. Всего выполнено шесть однодневных съемок: весной (май 2021 г.), летом (июль 2021 г., август 2022 г.) и осенью (октябрь 2020 г., ноябрь 2021 и 2022 гг.). Пробы отбирали на траверзе бухт Камышовой (ст. 1), Казачьей (ст. 2), Круглой (ст. 1), Стрелецкой (ст. 4), Карантинной (ст. 6) и Севастопольской (ст. 7), а также на станции в открытой части взморья (ст. 5), удаленной от берега на 2 км (рис. 1). Глубина в районе исследований составляла в основном 12–20 м, за исключением контрольной станции (ст. 5), где она достигала 50 м.



Рис. 1. Карта-схема района исследований (1–7 – номера станций). Источник: Google Maps (URL: <https://www.google.ru/maps>)

Fig. 1. A map-scheme of the study area (1–7 are station numbers). Adopted from Google Maps (URL: <https://www.google.ru/maps>)

Пробы отбирали в поверхностном и придонном слоях с помощью батометра БМ-48М. Определяли соленость (электросолемер ГМ-65 с регулярной калибровкой титрованием раствором AgNO_3), биохимическое потребление кислорода за пять суток (БПК₅), перманганатную окисляемость в щелочной среде, содержание кремния, а также минеральных и органических форм азота и фосфора по общепринятым методикам ^{1), 2)}. Для определения лимитирующего биогенного фактора использовали стехиометрические соотношения Редфилда (PR_{at}) ³⁾, которые для известных концентраций неорганических соединений азота, фосфора и кремния имели следующий вид:

$$PR_{at}(\text{N/P}) = 1.53 (1.35 \text{ NO}_2 + \text{NO}_3 + 3.44 \text{ NH}_4) / \text{PO}_4,$$

$$PR_{at}(\text{Si/N}) = \text{SiO}_4 / (1.47 (1.37 \text{ NO}_2 + \text{NO}_3 + 3.77 \text{ NH}_4)),$$

$$PR_{at}(\text{Si/P}) = 1.03 \text{ SiO}_4 / \text{PO}_4.$$

¹⁾ РД 52.24.420-2019 ; РД 52.24.383-2018 ; РД 52.24.380-2017 ; РД 52.24.381-2017 ; РД 52.24.382-2019 ; РД 52.24.432-2018 ; РД 52.10.805-2013 ; РД 52.24.387-2019.

²⁾ Об утверждении нормативов качества воды водных объектов рыбохозяйственного значения, в том числе нормативов предельно допустимых концентраций вредных веществ в водах водных объектов рыбохозяйственного значения : приказ Министерства сельского хозяйства Российской Федерации от 13 декабря 2016 года № 552. URL: <https://docs.cntd.ru/document/420389120> (дата обращения: 07.12.2023).

³⁾ Redfield A. C., Ketchum B. H., Richards F. A. The influence of organisms on the composition of sea-water // The sea: ideas and observations on progress in the study of the seas / edited by N. M. Hill. New York : Wiley Interscience, 1963. Vol. 2. P. 26–77.

Для определения видового состава, численности и биомассы фитопланктона пробы ($V = 2.0$ л) отбирали из верхнего слоя морской воды (0–1 м). Морскую воду фильтровали через ядерно-трековые мембраны с диаметром пор 1 мкм (Объединенный институт ядерных исследований, Дубна) на установке обратной фильтрации, концентрировали до объема 40–50 мл и фиксировали раствором Утермея. Видовую идентификацию микроводорослей проводили с использованием светового микроскопа при увеличении 200× и 400× (*Olympus BX43*) с помощью определителей^{4), 5)}. Численность и биомассу фитопланктона рассчитывали с использованием компьютерной программы «Глория», разработанной в ИнБЮМ [8]. Таксономические названия приведены в соответствии с базами данных *AlgaeBase* (URL: <https://www.algaebase.org>) и Всемирного реестра морских видов (URL: <https://www.marinespecies.org>).

Отбор проб меропланктона в период исследований выполнен на прибрежных станциях с глубиной до 13 м. Материал собирали сетью Джели с диаметром входного отверстия 36 см и размером ячеек мельничного газа 135 мкм. Облавливали слой воды 0–10 м от дна до поверхности. Обработку проводили на живом материале путем тотального подсчета личинок в камере Богорова под биноклем МБС-9; для уточнения видовой принадлежности личинок использовали световой микроскоп Микмед-5 [3].

Всего было обработано и проанализировано 96 проб для гидролого-гидрохимического анализа и по 23 пробы фито- и меропланктона.

Математические и статистические расчеты проводили в программе *Excel* 2016. Получены оценки минимальных, максимальных, средних значений и стандартных отклонений.

Результаты

Пространственно-временное распределение термохалинных и гидрохимических параметров

Температура и соленость. Температура поверхностного слоя изменялась от 14.4 (май) до 26.1 °С (август), снижаясь в результате осеннего выхолаживания до 13.1 °С (ноябрь). В период формирования термоклина (май – август) наблюдалось расслоение вод: максимальная разность температур поверхностного и придонного слоев на контрольной станции достигала 16.2 °С, а на мелководной станции (б. Камышовая) расслоение было минимальным, разница температуры не превышала 0.9 °С. Осенью в результате конвективного перемешивания температура выравнивалась по вертикали.

Пространственная структура термохалинных полей поверхностного слоя характеризовалась незначительными градиентами. Так, диапазон изменчивости температуры поверхностного слоя морской воды составил 0.3–1.4 °С, а солености – 0.08–0.21 ЕПС. Следует отметить повышение солености на контрольной станции по сравнению с бухтами. Экстремально низкие значения

⁴⁾ Прошкина-Лавренко А. И. Диатомовые водоросли планктона Черного моря. Москва – Ленинград : Изд. АН СССР, 1955. 224 с.

⁵⁾ Marine phytoplankton : A guide to naked flagellates and coccolithophorids / edited by C. R. Tomas. Academic Press, 1993. 263 p.

солёности отмечены в ноябре 2021 г. (17.63–17.84 ЕПС), в периоды других съёмок значения солёности поверхностного слоя менялись в диапазоне 18.02–18.54 ЕПС. Солёность увеличивалась от поверхности ко дну, максимальная разность значений солёности зафиксирована в слое 0–50 м (0.42 ЕПС 17.11.2021 и 0.33 ЕПС 09.07.2021).

БПК₅ и окисляемость. Значения БПК₅ изменялись в широком диапазоне 0.57–3.87 мг/дм³ (таблица). Показатели, близкие к нормативам качества воды водных объектов рыбохозяйственного значения и превышающие их (2.1 мг/дм³ и более), были отмечены весной (б. Камышовая, Круглая, Карантинная, Севастопольская) и в летние съёмки (б. Камышовая, Казачья, Круглая, Стрелецкая). При этом в осенний период значения БПК₅ не превышали нормативных значений на всех станциях, за исключением съёмки осенью 2021 г. на станции в б. Камышовой (3.84 мг/дм³).

Значения окисляемости в период наблюдений изменялись от 1.62 до 5.49 мгО/дм³ (таблица). Превышение норматива этого показателя (более 4.0 мгО/дм³) было отмечено во всех бухтах и в разные сезоны года. Средние значения окисляемости за период наблюдений по бухтам были ниже нормативов качества воды.

Биогенные элементы. Концентрация нитритного азота (NO₂) была низкой и не превышала 3.5 мкг/дм³ в поверхностном слое (таблица) и 4.6 мкг/дм³ в придонном (б. Стрелецкая). Концентрация нитратов в поверхностном слое изменялась от 4.6 (май 2021 г., б. Севастопольская) до 267.5 мкг/дм³ (август 2022 г., б. Карантинная). В придонном слое концентрация нитратов менялась от 3.8 до 86.8 мкг/дм³ (август 2022 г.). Средние значения нитратов в поверхностном слое по бухтам менялись от 12.7 в б. Круглой до 58.1 мкг/дм³ в б. Карантинной. Следует отметить съёмку в августе 2022 г., когда высокие показатели нитратов были зафиксированы на всех станциях и достигали 267.5 мкг/дм³ в поверхностном слое б. Карантинной. Повышенные значения концентрации в этой же съёмке зафиксированы также и в придонном слое (39–59 мкг/дм³), а максимум (86.8 мкг/дм³) зафиксирован на контрольной станции у дна. Концентрация азота аммонийного на Севастопольском взморье была низкой и находилась в пределах от 0.6 мкг/дм³ (б. Круглая, май 2021 г.) до 32.4 мкг/дм³ (б. Камышовая, август 2022 г.). В августе 2022 г. отмечена повышенная концентрация NH₄ на всех станциях. Концентрация азота органического (N_{орг}) менялась в широком диапазоне: от 331 мкг/дм³ в мае 2020 г. до 1375 мкг/дм³ в б. Стрелецкой в августе 2022 г. (таблица). Высокие значения концентрации N_{орг} были зафиксированы также в б. Круглой, Казачьей и Камышовой.

Концентрация фосфора минерального (PO₄) изменялась в пределах от 1.1 до 15.9 мкг/дм³. Минимальное содержание отмечено осенью 2022 г. на контрольной станции, максимальное – весной 2021 г. в б. Камышовой (таблица). Среднее значение PO₄ по акватории Севастопольского взморья за 2020–2022 гг. составляет 6.3 мкг/дм³. Содержание фосфора органического (P_{орг}) изменялось от 3.7 до 34.9 мкг/дм³. Максимальные значения отмечены в летний период в б. Казачьей. Средние значения P_{орг} за весь период исследований изменялись в диапазоне от 15.3 до 22.1 мкг/дм³. В целом значения концентрации P_{орг} были низкими и однородными. Сезонной изменчивости не отмечено.

Гидрохимические показатели в поверхностном слое на исследуемой акватории (2020–2022 гг.)

Hydrochemical parameters in the surface layer of the water area under study (2020–2022)

Бухта / Bay	Значение / Value	БПК ₅ , мг/дм ³ / BOD ₅ , mg/dm ³	Окисля- емость, мгО/дм ³ / PI, mgO/dm ³	Содержание, мкг/дм ³ / Content, µg/dm ³						
				NO ₂	NO ₃	NH ₄	N _{opr} / N _{org}	PO ₄	P _{opr} / P _{org}	Si
Казачья / Kazachya	среднее / mean	1.63	3.23	0.9	24.3	8.7	696	4.0	17.8	44.5
	min	0.70	1.75	0.4	4.7	2.1	378	1.4	3.7	12.4
	max	2.72*	4.37	1.3	90.3	15.0	1131	12.3	34.9	72.6
Камышовая / Kamyshovaya	среднее / mean	2.61	3.92	1.3	24.6	13.5	645	6.5	21.0	60.3
	min	1.31	2.30	0.9	5.3	1.7	331	2.4	5.0	14.8
	max	3.87	5.49	1.6	70.4	32.4	1188	15.9	26.7	98.6
Круглая / Kruglaya	среднее / mean	1.40	3.24	0.8	12.7	8.2	645	3.7	17.6	40.0
	min	0.57	2.01	0.1	5.4	0.6	372	1.4	4.3	17.9
	max	2.23	4.11	1.2	44.5	17.4	1235	10.9	26.4	63.7
Стрелецкая / Streletskaaya	среднее / mean	1.38	3.37	1.4	24.2	8.6	660	3.9	19.2	81.2
	min	0.60	1.98	0.7	5.1	1.8	412	1.1	4.1	23.8
	max	2.21	4.50	2.1	40.9	19.1	1375	10.5	33.4	118.1
Карантинная / Karantinnaaya	среднее / mean	1.43	3.22	1.4	58.1	8.8	545	5.1	17.1	64.8
	min	0.66	1.62	0.8	6.5	1.9	411	1.8	4.6	15.1
	max	2.72	4.73	3.5	267.5	17.8	824	11.5	27.3	152.4
Севастополь- ская / Sevastopol	среднее / mean	1.45	3.51	1.7	14.1	8.7	670	6.3	22.1	47.4
	min	1.10	2.39	1.2	4.6	2.6	459	3.5	15.0	19.8
	max	2.32	4.63	2.3	22.2	12.9	838	11.2	34.2	75.0
Контроль / Control	среднее / mean	1.50	3.89	0.8	14.3	7.7	618	4.2	22.8	31.0
	min	1.26	3.28	0.5	6.5	2.2	370	1.8	14.2	14.3
	max	2.02	4.42	1.0	29.1	13.6	801	9.5	29.1	58.7

Примечание. Жирным шрифтом выделены значения, превышающие ПДК²⁾ и нормативы качества воды водных объектов рыбохозяйственного значения²⁾. ПДК NO₂ – 20 мкг/дм³, NO₃ – 9000 мкг/дм³, NH₄ – 390 мкг/дм³. Нормативные значения БПК₅ – не более 2.1 мкг/дм³, окисляемости – 4.0 мкг/дм³.

Note. Values exceeding maximum permissible concentrations (MPC)²⁾ and limits for water quality of fisheries²⁾ are given in bold. PI – permanganate index. MPC of NO₂ – 20 µg/dm³, NO₃ – 9,000 µg/dm³, NH₄ – 390 µg/dm³. BOD₅ limit value – under 2.1 µg/dm³, PI limit value – 4.0 µg/dm³.

Содержание кремния (Si) отличалось большой изменчивостью. Так, в поверхностном слое концентрация Si менялась в пределах от 12.4 мкг/дм³ (июль 2021 г.) в б. Казачьей до 152.4 мкг/дм³ (август 2022 г.) в б. Карантинной (таблица). Высокие значения концентрации Si зафиксированы во всех бухтах в августе 2022 г. как в поверхностном (64–152 мкг/дм³), так и в придонном слое (100–153 мкг/дм³). Сезонной изменчивости концентрации кремния не отмечено.

Соотношение биогенных элементов

Результаты расчетов отношения Редфилда (PR_{at}) для азота, фосфора и кремния с целью определения лимитирующего фактора для фитопланктона представлены на рис. 2. Наблюдался широкий диапазон относительных значений N/P – от 1 до 53. Минимальные значения отмечены в весенний период (1–3), что свидетельствует о значительном ограничении азота. Соотношение было близко к классическому коэффициенту Редфилда в летний период (за исключением б. Казачьей и Карантинной), осенью 2020 г. в б. Карантинной и Севастопольской и осенью 2021 г. в б. Камышовой. В других случаях соотношение значений N/P превышало 16, что соответствовало ограничению, вызванному фосфором.

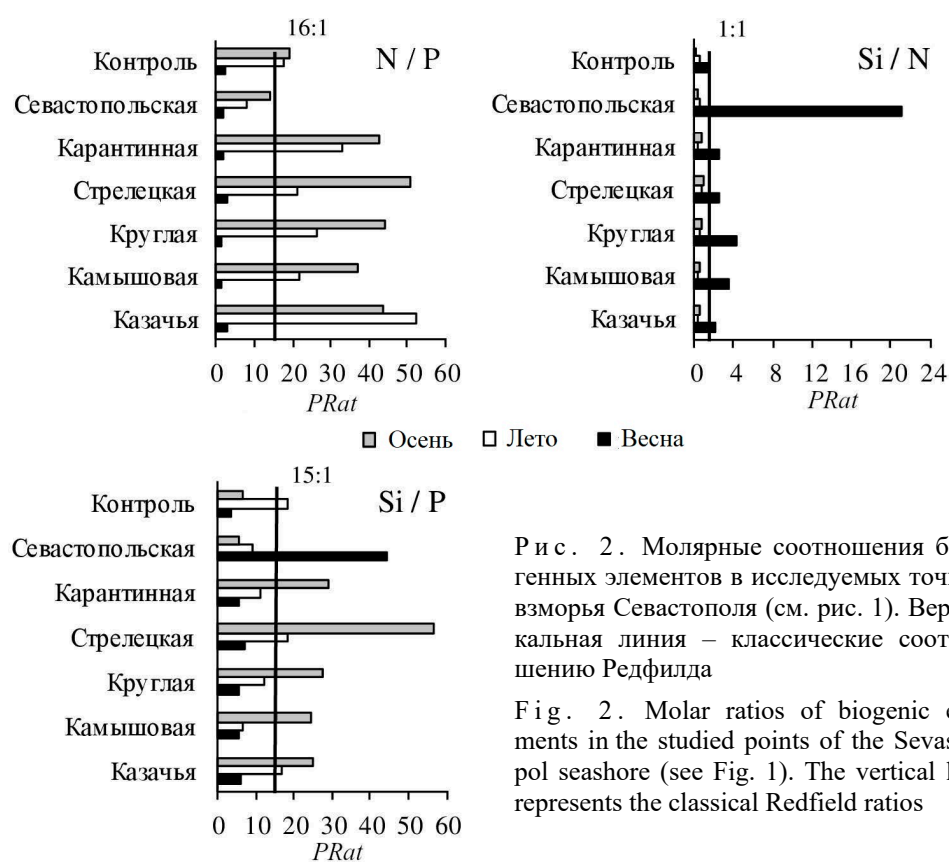


Рис. 2. Молярные соотношения биогенных элементов в исследуемых точках взморья Севастополя (см. рис. 1). Вертикальная линия – классические соотношению Редфилда

Fig. 2. Molar ratios of biogenic elements in the studied points of the Sevastopol seashore (see Fig. 1). The vertical line represents the classical Redfield ratios

Соотношение Si/N варьировало от 0.2 до 21. Значение Si/N более единицы отмечено в весенний период, а также осенью 2020 г. в б. Стрелецкой. Соотношение Si/P изменялось от 3 до 56. В осенний период 2020 и 2021 г. это соотношение превышало классические значения. В весенне-летний период наблюдались пониженные значения соотношения Si/P.

С учетом соотношения всех трех элементов (N/Si/P) значения, близкие к классическому соотношению Редфилда, наблюдались только осенью 2020 г. в б. Карантинной (18/17/1). В остальное время отмечались существенные отклонения.

Фитопланктон: динамика таксономического состава и плотности

Всего в пробах фитопланктона отмечено 75 видов микроводорослей, из которых 35 относятся к диатомовым, 32 – к динофитовым. Остальные виды относятся к отделам Haptophyta, Euglenozoa, Ochrophyta, Cercozoa. Максимальные значения численности и биомассы фитопланктона во всех бухтах отмечены в весенний период (рис. 3). Исключение составил осенний период 2020 г. в б. Севастопольской, когда биомасса планктонных микроводорослей превышала $400 \text{ мг} \cdot \text{л}^{-1}$, численность фитопланктона при этом была низкой. В летний и осенний период 2021 г. обилие фитопланктона было низким.

Пространственно-временная изменчивость численности основных групп фитопланктона свидетельствует о высокой вариабельности состава сообщества. Осенью 2020 и 2021 гг. отмечено абсолютное доминирование диатомовых водорослей как по численности (75–100 %), так и по биомассе (64–100 %). В весенний период диатомовые с кокколитофоридами преобладали по численности (98–99 %) в б. Камышовой, Круглой и Севастопольской, по биомассе – на всех станциях. Летом диатомовые доминировали по численности (52–80 %), но уступали динофлагеллятам (57–91 %) по биомассе. Осенью 2020 г. на всех станциях основной вклад (57–97 %) в суммарную численность и биомассу вносила крупноклеточная диатомовая водоросль *Proboscia alata*, а осенью 2021 г. – *Pseudosolenia calcar-avis* (87–99 %). Почти на всех станциях в мае



Р и с . 3 . Суммарные значения численности N (a) и биомассы B (b) фитопланктона на станциях в бухтах Севастополя (см. рис. 1)

Fig. 3. The total abundance N (a) and biomass B (b) of phytoplankton in Sevastopol bays (see Fig. 1)

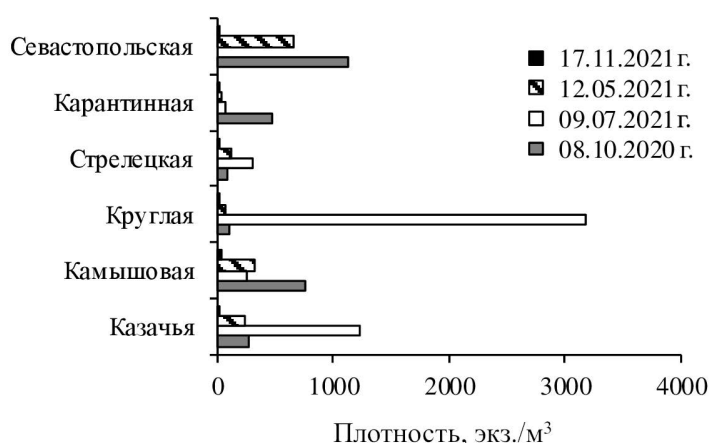
2021 г. доминировала кокколитофорида *Emiliania huxleyi* (37–58 % от суммарной численности), а в б. Камышовой наряду с кокколитофоридами значительный вклад в численность вносили диатомовые *Pseudo-nitzschia calliantha* и *Chaetoceros wighamii* (23 и 45 % от суммарной численности соответственно).

Основу биомассы (40–58 % от суммарной) весеннего фитопланктона во всех бухтах составила *P. alata*. В летний период в б. Казачьей и Стрелецкой пики численности давали динофитовые рода *Prorocentrum*. В б. Камышовой диатомовые *Chaetoceros tortissimus*, *Leptocyldrus danicus* и *P. alata* составили более 68 % общей численности, в б. Круглой доминировали диатомовые *P. calliantha* и *P. alata* (более 50 % общей численности). Основу биомассы формировали крупноклеточная диатомовая *P. alata* и динофлагелляты рода *Prorocentrum*.

Меропланктон: динамика таксономического состава и плотности

В период исследований в планктоне идентифицированы личинки 41 вида донных беспозвоночных, относящихся к следующим таксонам: тип Annelida, класс Polychaeta – 16 видов; тип Mollusca, классы Bivalvia – 7, Gastropoda – 9 видов; тип Arthropoda, подтип Crustacea: инфракласс Cirripedia – 2 вида и отряд Decapoda – 7 видов. Единично встречались не идентифицированные до вида планулы Coelenterata (Тип Cnidaria), личинки Kamptozoa (Тип Entoprocta) и Bryozoa (Тип Bryozoa).

На всей акватории Севастопольского взморья минимальное количество личинок донных беспозвоночных зафиксировано в холодный период года. В ноябре 2021 г. суммарная плотность меропланктона не превышала 29 экз/м³ (рис. 4). В планктоне встречались великонхи двустворчатых моллюсков мидии *Mytilus galloprovincialis* Lamarck, 1819 и спизулы *Spisula subtruncata* (Da Costa, 1778), не идентифицированные до вида велигеры брюхоногих моллюсков, личинки многощетинковых червей (*Spio decorata* Bobretzky, 1870) и науплиусы усонного рака *Amphibalanus improvisus* (Darwin, 1854).



Р и с . 4. Динамика плотности меропланктона в бухтах Севастополя (см. рис. 1)

F i g . 4. Dynamics of meroplankton density in Sevastopol bays (see Fig. 1)

Существенное увеличение количества личинок в планктоне отмечено в теплый период года, когда начинали размножаться многие виды донных беспозвоночных. В мае максимальная плотность меропланктона (661 экз/м^3) зарегистрирована в б. Севастопольской, в б. Камышовой она достигала 322 экз/м^3 , тогда как в остальных районах колебалась от 26 экз/м^3 (в б. Карантинной) до 227 экз/м^3 (в б. Казачьей) (рис. 4).

Видовой состав меропланктона стал более разнообразен. Из моллюсков, кроме личинок мидии, в планктоне появились великонхи двустворчатых моллюсков семейства *Cardiidae*, велигеры брюхоногих моллюсков семейства *Rissoidea*. Плотность личинок мидий была невысока – до 15 экз/м^3 , тогда как плотность велигеров *Gastropoda* достигала 147 экз/м^3 (в б. Камышовой). В планктоне появились личинки многощетинковых червей *Harmothoe reticulata* (Claparède, 1870), *Pholoe inornata* Johnston, 1839, *Polydora cornuta* Bosc, 1802, *Alitta succinea* (Leuckart, 1847) и не идентифицированные до вида личинки семейства *Nereididae*. Единично отмечены личинки *Decapoda* (*Hippolyte leptocerus* (Heller, 1863), *Upogebia pusilla* (Petagna, 1792)). По численности во всех бухтах доминировали личинки усонного рака *A. improvisus* – с максимумом 597 экз/м^3 (в б. Севастопольской) до 227 экз/м^3 (в б. Казачьей).

В июле максимальная плотность меропланктона (3180 экз/м^3) была отмечена в б. Круглой из-за высокой плотности личинок брюхоногих моллюсков (2173 экз/м^3). В планктоне доминировали велигеры биттиума (*Bittium reticulatum* (Da Costa, 1778) и представителей семейства *Rissoidea*. Тогда как в других бухтах их плотность не превышала 135 экз/м^3 и только в б. Казачьей достигала 373 экз/м^3 . В этот период во всех бухтах отмечено и увеличение плотности личинок усонных раков, но преобладали в планктоне наупliusы другого вида – *Verruca spengleri* Darwin, 1854.

В октябре плотность меропланктона была выше в б. Севастопольской и Камышовой – до 1126 и 756 экз/м^3 соответственно (рис. 4). При этом количество личинок в остальных бухтах колебалось от 91 экз/м^3 (в б. Стрелецкой) до 463 экз/м^3 (в б. Карантинной). По численности преобладали велигеры брюхоногих моллюсков (*Retusa truncatula* (Bruguère, 1792), *Caecum trachea* (Montagu, 1803), *Limapontia capitata* (O. F. Müller, 1774), *Rissoa parva* (Da Costa, 1778), *Rissoa* sp.). Их максимальная суммарная плотность (235 экз/м^3) зарегистрирована в б. Камышовой. В этот период отмечено также увеличение количества личинок мидии *M. galloprovincialis*, находящихся на стадии великонха «с глазком». В б. Камышовой их плотность составляла 110 экз/м^3 , в остальных районах исследования плотность личинок мидий колебалась от 9 до 62 экз/м^3 . Плотность личинок полихет не превышала 29 экз/м^3 , встречались *Lysidice ninetta* Aud. et H. M. Edw., 1833 *Magelona rosea* Moore, 1907, *Malacoceros fuliginosus* (Claparède, 1870) и не определенные до вида *Prionospio* sp. и *Phyllodoce* sp. Наупliusы усонного рака *A. improvisus* (до 782 экз/м^3) преобладали в б. Севастопольской. В октябре в планктоне зарегистрированы личинки десятиногих раков (*Clibanarius erythropus* (Latreille, 1818), *Pisidia longimana* (Risso, 1816), *Xantho poressa* (Olivier, 1792), *Pachygrapsus marmoratus* (Fabricius, 1787), *Athanas nitescens* (Leach, 1813), но их суммарная плотность не превышала 30 экз/м^3 (отмечена в б. Карантинной).

Динамика плотности меропланктона во всех бухтах была относительно синхронна – минимальные значения (до 29 экз/м³) характерны для холодного периода года с температурой воды 14.5 °С (ноябрь), увеличение плотности отмечено при прогреве воды (май, июль, октябрь). В меропланктоне по численности преобладали науплиусы усонного рака *Amphibalanus improvisus*: в холодный период года они встречались единично, а в мае и октябре доминировали в планктоне, что влияло на суммарные показатели плотности меропланктона в этот период. Максимальное количество личинок баянусов зарегистрировано в б. Севастопольской и Камышовой.

Обсуждение

Представляет интерес сравнение гидролого-гидрохимических данных, полученных нами по одной схеме станций в 2001–2005 гг. и 2020–2022 гг. [2]. В 2020–2022 гг. отмечено повышение солёности в поверхностном слое на исследуемой акватории. В 2001–2005 гг. средние значения солёности варьировали от 17.70 до 17.94 ЕПС [2], тогда как в 2020–2022 гг. солёность достигала 18.54 ЕПС. На тренд увеличения солёности в прибрежье Севастополя в последние годы указывают и другие авторы [3, 9]. Положительный тренд солёности в поверхностном слое обнаружен за период с 2001 по 2018 г. в б. Карантинной [9]. Исследования в шельфовой зоне северо-восточной части Чёрного моря также показали поступательное увеличение солёности в верхнем 200-метровом слое моря с 2010 по 2020 г. [10]. Авторы связывают это прежде всего с колебаниями климатического режима Чёрного моря.

По официальным данным Крымстата (URL: <https://82.rosstat.gov.ru/>), численность населения г. Севастополя за последние 20 лет увеличилась на 33 %, тогда как фактически, по оценкам правительства, этот показатель превышает 40 %. Отмечено расширение площади городской застройки в прибрежной зоне, соответственно увеличился объём хозяйственно-бытовых вод и нагрузка на очистные сооружения. Кроме того, с повышением урбанизации увеличивается объём ливневых стоков и ухудшается их качество [5, 11]. Все это приводит к повышению концентрации минеральных и органических веществ в прибрежной акватории и влияет на уровень загрязнения поверхностных вод, который мы оценивали по двум показателям – БПК₅ и окисляемости. Первый показатель отражает загрязнение среды нестойким органическим веществом, второй свидетельствует о степени загрязнения стойким органическим веществом. Средние значения БПК₅, полученные до 2005 г. на взморье Севастополя, не превышали 0.79 мг/дм³ [2], тогда как в современный период значения БПК₅ превышали нормативы качества воды водных объектов рыбохозяйственного значения весной (в б. Камышовой, Круглой, Карантинной, Севастопольской) и летом (в б. Камышовой, Казачьей, Круглой, Стрелецкой), что указывает на повышение степени загрязнённости взморья. Это же подтверждают данные об окисляемости (превышение нормативов было отмечено во всех бухтах и в разные сезоны) и о концентрации азота. Следует отметить, что на содержание биогенных веществ влияет динамика вод, антропогенное загрязнение и взаимодействие с биотой.

На динамику численности, видовое разнообразие и продуктивность фитопланктонного сообщества влияет комплекс различных факторов окружающей среды: температура, свет, биогенные вещества, микроэлементы, поллютанты, потребление другими компонентами пищевых цепей, динамика вод и т. д. Однако выделить влияние отдельных факторов в природных условиях не представляется возможным. Влияние температуры и света на размножение разных групп фитопланктона широко известно. Для исследования воздействия микроэлементов и поллютантов необходимо проведение экспериментальных работ. Для обсуждения влияния ветро-волновых процессов необходимы длинные ряды наблюдений. Материальной базой создания первичной продукции в водоемах являются биогенные вещества, представленные минеральными соединениями азота, фосфора и кремния. Концентрация этих веществ и их соотношение регулируют жизнедеятельность фитопланктона и обеспечивают биологическую продуктивность водных экосистем в целом. В связи с этим мы попытались оценить связи биогенных веществ с развитием фитопланктонных сообществ в исследуемых акваториях в разные сезоны.

Сезонной закономерности в изменении концентрации нитратного и органического азота не наблюдали, что подтверждает влияние антропогенного загрязнения как основного источника азота. При этом концентрация нитратного азота, необходимого для фитопланктона, варьировала в широких пределах. Максимальные концентрации NH_4^+ отмечены в осенний период, когда в составе планктона доминировали крупноклеточные диатомовые водоросли. Известно, что фитопланктон потребляет NH_4 в процессе фотосинтеза, при этом водоросли затрачивают меньше энергии по сравнению с ассимиляцией нитратов [12]. Поглощение восстановленных форм азота, к которым относится NH_4^+ , связано с размером клеток фитопланктона. Мелкоклеточный фитопланктон преимущественно ассимилирует аммонийный азот, тогда как крупноклеточный фитопланктон является основным потребителем нитратов [13]. Средние значения концентраций минеральных и органических форм азота в бухтах Камышовой, Казачьей и Круглой превышали аналогичные показатели, отмеченные до 2005 г. [2].

В период массового развития фитопланктона с преимущественным доминированием кокколитофорид (весна 2021 г.) отмечены максимальные концентрации фосфатов. В этот же период значение коэффициента Редфилда $PR_{at}(\text{N/P})$ минимально (1–3), что может свидетельствовать об азотном лимитировании продуцирования фитопланктона. Аналогичные данные о биогенных элементах в весенний период получены А. С. Микаэляном с соавторами [14]. Авторы отметили интересную для Черного моря особенность: фосфаты положительно влияют на массовое развитие кокколитофорид при азотном лимитировании первичной продукции. В летний и осенний периоды мы отмечали в большинстве случаев недостаток фосфора. Значимость минерального фосфора как ведущего фактора химического лимитирования продукции фитопланктона наряду с длительностью светового дня и температурой воды на взморье Севастополя отмечается в работе [15].

Содержание кремния в 2020–2022 гг. отличалось большой изменчивостью: значения плавно уменьшались от максимальных, зафиксированных весной к пониженным летом и осенью вследствие потребления этого элемен-

та фитопланктоном. Вполне вероятно, что силикаты не были лимитирующим фактором для роста фитопланктона весной, когда наряду с кокколитофоридами доминировали диатомовые водоросли. Самое низкое содержание кремния отмечено летом, когда отношение кремния к азоту составило менее 0.5, в этот период диатомовые не были доминирующей группой фитопланктона. Отклонение же от классических соотношений Редфилда (Si/N) летом и осенью в отдельных бухтах свидетельствует о более высоком потреблении силикатов фитопланктоном по сравнению с нитратами.

Избыток азота в сочетании с недостатком фосфора, а в некоторых случаях и кремния привел к формированию несбалансированной стехиометрии растворенных биогенных веществ. Этот дисбаланс выразился в отклонениях от классических коэффициентов Редфилда (N/Si/P), а также в широких вариациях этих соотношений. Обогащение биосферы азотом, концентрация которого в океане значительно превышает содержание фосфора, вызывает беспокойство, поскольку это может повлиять на прибрежные экосистемы [16].

Прямого влияния биогенных элементов и фитопланктона на динамику плотности меропланктона не обнаружено. Вероятно, влияние фитопланктона имеет отсроченный характер, к тому же нельзя исключать основного влияния температурного фактора на массовое размножение отдельных таксонов меропланктона. В то же время, учитывая, что личинки донных беспозвоночных питаются фитопланктоном, можно предположить и обратное влияние. Так, в июле 2021 г. в б. Круглой на фоне низких значений численности фитопланктона зарегистрировано максимальное значение плотности меропланктона, что может быть связано с выеданием фитопланктона личинками. Плотность меропланктона осенью 2020 и весной 2021 г. в б. Камышовой и Севастопольской была высокой вследствие увеличения количества личинок усконогих раков и двустворчатых моллюсков, что связано с сезонными циклами их размножения, и не зависела от гидрохимических параметров. При этом большое количество причальных стенок, молов и других гидротехнических сооружений в указанных бухтах привлекает личинок этих групп меропланктона как удобный субстрат для оседания.

Заключение

В период исследований отмечено увеличение уровня загрязнения взморья Севастополя по сравнению с периодом 2001–2005 гг. Максимальные значения БПК₅ во всех бухтах превышали нормативы качества воды водных объектов рыбохозяйственного значения. По этому показателю бухты можно расположить от наиболее загрязненной нестойкими органическими веществами к менее загрязненной в следующем порядке: Камышовая, Казачья, Карантинная, Севастопольская, Круглая, Стрелецкая. Максимальные значения окисляемости во всех бухтах также превышали нормативы качества. Концентрация нитратов на Севастопольском взморье повышалась от весны к лету и понижалась к осени. Средние значения концентрации минеральных и органических форм азота в б. Камышовой, Казачьей и Круглой превышали аналогичные показатели, отмеченные до 2005 г. Минимальная концентрация нитратов отмечена в б. Круглой, максимальная – в б. Карантинной. Концентрации аммонийного азота изменялись по сезонам аналогично изменчивости нитратов.

Состав сообщества фитопланктона показал значительную пространственно-временную изменчивость численности основных групп. Осенью доминировали крупноклеточные диатомовые водоросли, в весенний период – мелко-клеточные колониальные диатомовые и кокколитофорида *Emiliania huxleyi*, летом по численности преобладали диатомовые, по биомассе – динофлагелляты. Отмечена относительная синхронность сезонной динамики плотности меропланктона в бухтах Севастополя – минимальные значения зарегистрированы в холодный период года, а максимальные – в теплый. В меропланктоне доминировали по плотности науплиусы усонного рака *Amphibalanus improvisus*, преобладающего в обрастании твердых субстратов. Максимальное количество личинок этого вида зарегистрировано в б. Севастопольской и Камышовой.

Полученные нами результаты могут быть использованы при оценке функциональной реакции прибрежных экосистем Черного моря на изменчивость антропогенных и природных факторов.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Павлова Е. В., Лисицкая Е. В. Состояние зоопланктонных сообществ в прибрежных водах Карадагского природного заповедника в 2002–2005 гг. // Карадаг – 2009 : сборник научных трудов, посвященный 95-летию Карадагской научной станции и 30-летию Карадагского природного заповедника Национальной академии наук Украины / ред. А. В. Гаевская, А. Л. Морозова. Севастополь : ЭКОСИ-Гидрофизика, 2009. С. 292–312. EDN ZTSFYD.
2. Гидрохимическая характеристика отдельных бухт Севастопольского взморья / Е. А. Куфтаркова [и др.] // Труды Южного научно-исследовательского института морского рыбного хозяйства и океанологии. Керчь : ЮгНИРО, 2008. Т. 46. С. 110–117. EDN VSMKAD.
3. Комплексные исследования экологического состояния прибрежной акватории Севастополя (Западный Крым, Черное море) / В. И. Рябушко [и др.] // Экологическая безопасность прибрежной и шельфовой зон моря. 2020. № 1. С. 103–118. EDN HETKTQ. <https://doi.org/10.22449/2413-5577-2020-1-103-118>
4. Manilyuk Y. V., Lazorenko D. I., Fomin V. V. Seiche oscillations in the system of Sevastopol Bays // Water Resources. 2021. Vol. 48, iss. 5. P. 726–736. EDN JYJFLJ. <https://doi.org/10.1134/S0097807821050122>
5. Ломакин П. Д., Чепыженко А. А. Гидрофизические условия и характеристика загрязнения вод бухты Казачья (Крым) в сентябре 2018 года // Системы контроля окружающей среды. 2019. № 1. С. 48–54. EDN ZDRMSD. <https://doi.org/10.33075/2220-5861-2019-1-48-54>
6. Ломакин П. Д., Чепыженко А. И. Оценка загрязнения вод Стрелецкой бухты (Крым), связанного с эксплуатацией флота // Эксплуатация морского транспорта. 2019. № 3. С. 131–136. EDN НКМАЕУ. <https://doi.org/10.34046/aumsuomt92/20>
7. Источники загрязнения прибрежных вод Севастопольского района / В. М. Грузинов [и др.] // Океанология. 2019. Т. 59, № 4. С. 579–590. EDN VEOVBB. <https://doi.org/10.31857/S0030-1574594579-590>
8. Лях А. М., Брянцева Ю. В. Компьютерная программа для расчета основных параметров фитопланктона // Экология моря. 2001. Вып. 58. С. 87–90. EDN WIAGOT.

9. Long-term variations of thermohaline and hydrochemical characteristics in the mussel farm area in the coastal waters off Sevastopol (Black Sea) in 2001–2018 / S. V. Kapranov [et al.] // *Continental Shelf Research*. 2020. Vol. 206. P. 104–185. EDN SISXSM. <https://doi.org/10.1016/j.csr.2020.104185>
10. Подымов О. И., Зацепин А. Г., Очеретник В. В. Рост солёности и температуры в деятельном слое северо-восточной части Чёрного моря с 2010 по 2020 год // *Морской гидрофизический журнал*. 2021. Т. 37, № 3. С. 279–287. EDN GVAYYQ. <https://doi.org/10.22449/0233-7584-2021-3-279-287>
11. Ломакин П. Д., Чепыженко А. И., Попов М. А. Антропогенные изменения морфометрических характеристик бухты Круглой (Крым) // *Биоразнообразие и устойчивое развитие*. 2024. Т. 9, № 1. С. 77–90. EDN PJWLZF.
12. Dortch Q. The interaction between ammonium and nitrate uptake in phytoplankton // *Marine Ecology Progress Series*. 1990. Vol. 61. P. 183–201. <https://doi.org/10.3354/meps061183>
13. The contribution of small phytoplankton communities to the total dissolved inorganic nitrogen assimilation rates in the East/Japan Sea: An experimental evaluation / P. S. Bhavya [et al.] // *Journal of Marine Science and Engineering*. 2020. Vol. 8, iss. 11. 854. <https://doi.org/10.3390/jmse8110854>
14. Микаэлян А. С., Силкин В. А., Паутова Л. А. Развитие кокколитофорид в Чёрном море: межгодовые и многолетние изменения // *Океанология*. 2011. Т. 51, № 1. С. 45–53. EDN NDJCPH.
15. Влияние первичной продукции фитопланктона на оборот биогенных элементов в прибрежной акватории Севастополя (Чёрное море) / В. Н. Егоров [и др.] // *Биология моря*. 2018. Т. 44, № 3. С. 207–214. EDN XPTTZB.
16. Sutcu A., Kocum E. Phytoplankton stoichiometry reflects the variation in nutrient concentrations and ratios in a nitrogen-enriched coastal lagoon // *Chemistry and Ecology*. 2017. Vol. 33, iss. 5. P. 464–484. <https://doi.org/10.1080/02757540.2017.1316492>

Поступила 23. 07.2024 г.; одобрена после рецензирования 5.09.2024 г.; принята к публикации 25.03.2025 г.; опубликована 30.06.2025 г.

Об авторах:

Поспелова Наталья Валериевна, ведущий научный сотрудник, ФГБУН ФИЦ «Институт биологии южных морей имени А. О. Ковалевского РАН» (299011, Россия, г. Севастополь, пр. Нахимова, д. 2), кандидат биологических наук, **ORCID ID: 0000-0002-3165-2090**, **Scopus Author ID: 56884605100**, **ResearcherID: C-7572-2016**, **SPIN-код: 4016-7541**, nv.pospelova@ibss-ras.ru

Щуров Сергей Вячеславович, научный сотрудник, ФГБУН ФИЦ «Институт биологии южных морей имени А. О. Ковалевского РАН» (299011, Россия, г. Севастополь, пр. Нахимова, д. 2), **ORCID ID: 0000-0002-8913-2637**, **Scopus Author ID: 57214992790**, **ResearcherID: AAC-9044-2022**, **SPIN-код: 3036-2366**, skcrimea@mail.ru

Ковригина Неля Петровна, старший научный сотрудник, ФГБУН ФИЦ «Институт биологии южных морей имени А. О. Ковалевского РАН» (299011, Россия, г. Севастополь, пр. Нахимова, д. 2), кандидат географических наук, **ORCID ID: 0000-0002-6734-8285**, **Scopus Author ID: 6507114864**, **ResearcherID: AAC-9395-2022**, **SPIN-код: 6786-0143**, npkovrigina@yandex.ru

Лисицкая Елена Васильевна, старший научный сотрудник, ФГБУН ФИЦ «Институт биологии южных морей имени А. О. Ковалевского РАН» (299011, Россия, г. Севастополь, пр. Нахимова, д. 2), кандидат биологических наук, **ORCID ID: 0000-0002-8219-4616**, **Scopus Author ID: 6504112143**, **ResearcherID: T-1970-2017**, **SPIN-код: 4973-5446**, lisitskaya@ibss.su

Трощенко Олег Александрович, старший научный сотрудник, Институт биологии южных морей им. А. О. Ковалевского РАН (299011, Россия, г. Севастополь, пр. Нахимова, д. 2), кандидат географических наук, **ORCID ID: 0000-0001-5200-9996**, **Scopus Author ID: 57218589904**, **ResearcherID: AAC-9364-2022**, **SPIN-код: 5992-2938**, *oleg_tr59@mail.ru*

Заявленный вклад авторов:

Поспелова Наталья Валериевна – обзор литературы по проблеме исследования, анализ и интерпретация результатов по фитопланктону, статистический анализ, формулирование выводов

Щуров Сергей Вячеславович – разработка концепции, формулировка и постановка задачи, обзор литературы по проблеме исследования, анализ и интерпретация результатов по гидрологии и гидрохимии, формулирование выводов

Ковригина Неля Петровна – анализ и интерпретация результатов по гидрологии и гидрохимии, формулирование выводов

Лисицкая Елена Васильевна – обзор литературы по проблеме исследования, анализ и интерпретация результатов по меропланктону, формулирование выводов

Трощенко Олег Александрович – анализ и интерпретация результатов по гидрологии и гидрохимии, формулирование выводов

Все авторы прочитали и одобрили окончательный вариант рукописи.