

Содержание биогенных элементов в поровых водах поверхностного слоя донных отложений Севастопольской бухты

К. И. Гуров *, А. В. Вареник, М. А. Мыслина

Морской гидрофизический институт РАН, Севастополь, Россия

* e-mail: gurovki@gmail.com

Аннотация

Цель работы – оценить особенности пространственно-временного распределения концентрации биогенных элементов (нитратов, нитритов, аммония, фосфатов и кремнекислоты) в поровых водах поверхностного слоя донных отложений Севастопольской бухты по современным натурным данным. Пробы были отобраны с помощью дночерпателя ДЧ-0,025. Поровые воды извлекали с помощью центрифуги *Elmi CM-6MT*. Концентрации минеральных форм биогенных элементов определяли фотометрически с использованием спектрофотометра КФК-3КМ и проточного автоматического анализатора биогенных элементов *Scalar San++* (Нидерланды) после фильтрации (фильтр 0.45 мкм), за исключением проб для определения ионов аммония. Аммонийный азот определяли с помощью модифицированного метода Сэджи – Солорзано. Коэффициенты корреляции и степень их достоверности были рассчитаны с помощью программы *Statistica*. Получены качественные и количественные характеристики пространственного распределения концентраций биогенных элементов в поровых водах из верхнего слоя донных отложений, отобранных в Севастопольской бухте в 2024 г. По результатам анализа была выявлена их сезонная изменчивость, установлены связи с географическим расположением станций, типом донных отложений и геохимическими характеристиками их твердой фазы. В верхнем слое донных отложений Севастопольской бухты формируется преимущественно слабощелочная восстановительная среда: значения pH и Eh изменяются в диапазоне от 7.1 до 7.8 и от 0 до –270 мВ соответственно. Установлено, что в течение года средние концентрации нитритов изменяются в диапазоне 0.23–0.37 мкМ; нитратов – 0.71–3.61 мкМ; фосфатов – 11.91–25.84 мкМ; кремнекислоты – 21.14–297.30 мкМ; ионов аммония – 139.64–543.76 мкМ. Выявлена отрицательная корреляция концентраций аммония и фосфатов с Eh (r равно –0.8 и –0.7 соответственно), положительная – фосфатов и кремнекислоты с pH (r равно 0.7 и 0.6 соответственно). Наблюдаемые для донных отложений Севастопольской бухты слабощелочные восстановительные условия являются определяющим фактором повышенных концентраций аммонийного азота и фосфатов, а также низких концентраций нитратов. Внутригодовая динамика концентраций биогенных элементов в поровых водах донных отложений бухты определяется влиянием гидрологических параметров вод (изменение температуры вод), гидродинамических условий

© Гуров К. И., Вареник А. В., Мыслина М. А., 2026



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

в отдельных районах бухты (осенне-зимнее перемешивание), а также дополнительным локальным поступлением биогенных элементов с ливневыми и канализационными стоками.

Ключевые слова: Севастопольская бухта, донные отложения, окислительно-восстановительные условия, поровые воды, биогенные элементы, нитраты, нитриты, фосфаты, кремнекислота, ионы аммония

Благодарности: работа выполнена в рамках государственного задания по теме № FNNN-2024-0001 ФГБУН ФИЦ МГИ «Фундаментальные исследования процессов, определяющих потоки вещества и энергии в морской среде и на ее границах, состояние и эволюцию физической и биогеохимической структуры морских систем в современных условиях».

Для цитирования: Гуров К. И., Вареник А. В., Мыслина М. А. Содержание биогенных элементов в поровых водах поверхностного слоя донных отложений Севастопольской бухты // Экологическая безопасность прибрежной и шельфовой зон моря. 2026. № 3. С. 76–92. EDN JGCVQY.

Concentrations of Nutrients in the Pore Waters of the Sevastopol Bay Bottom Sediments

K. I. Gurov*, A. V. Varenik, M. A. Myslina

Marine Hydrophysical Institute of RAS, Sevastopol, Russia

** e-mail: gurovki@gmail.com*

Abstract

The paper aims to assess features of the spatio-temporal distribution of nutrients concentrations in the pore waters of the sediment upper layer based on modern *in situ* data. Samples were collected using a DCh-0.025 bottom grab sampler. Pore water was extracted by centrifugation (Elmi CM-6MT centrifuge). Concentrations of inorganic nutrients were determined photometrically using a KFK-3KM spectrophotometer and a Skalar San++ continuous flow autoanalyzer (the Netherlands) after filtration (0.45 μm membrane), except for ammonium samples. Ammonium nitrogen was measured by a modified Sagi-Solorzano method. Correlation coefficients and their significance were calculated using the Statistica software. Qualitative and quantitative characteristics of the spatial distribution of nutrient concentrations in pore waters from the upper sediment layer were obtained for samples collected in Sevastopol Bay in 2024. Seasonal variability was revealed, and relationships with station location, sediment type and geochemical properties of the solid phase were established. In the upper sediment layer of Sevastopol Bay, a weakly alkaline reducing environment predominated: pH and Eh values ranged from 7.1 to 7.8 and from 0 to -270 mV, respectively. Over the year, mean concentrations varied within the following ranges: nitrites were 0.23–0.37 μM ; nitrates were 0.71–3.61 μM ; phosphates were 11.91–25.84 μM ; silicic acid was 21.14–297.30 μM ; and ammonium was 139.64–543.76 μM . A negative correlation was found between ammonium and phosphate concentrations and Eh ($r = -0.8$ and -0.7 , respectively), while phosphates and silicic acid showed positive correlations with pH ($r = 0.7$ and 0.6 , respectively). The weakly alkaline reducing conditions observed in the sediments of Sevastopol Bay are the main factor controlling elevated ammonium and phosphate concentrations and low nitrate levels. Intra-annual dynamics of nutrient concentrations in pore waters are influenced by hydrological parameters (water temperature), hydrodynamic conditions in different parts of the bay (autumn–winter mixing), as well as by additional local inputs of nutrients with stormwater and sewage discharges.

Keywords: Sevastopol Bay, bottom sediments, redox conditions, pore waters, nutrients, nitrates, nitrites, phosphorus, silicon, ammonium

Acknowledgements: The work was carried out under state assignment of MHI RAS on topic No. FNNN-2024-0001 “Fundamental studies of the processes that determine fluxes of matter and energy in the marine environment and at its boundaries, the state and evolution of the physical and biogeochemical structure of marine systems in modern conditions”.

For citation: Gurov, K.I., Varenik, A.V. and Myslina, M.A., 2026. Concentrations of Nutrients in the Pore Waters of the Sevastopol Bay Bottom Sediments. *Ecological Safety of Coastal and Shelf Zones of Sea*, (3), pp. 76–92.

Введение

Севастопольская бухта – классическая полузамкнутая акватория с затрудненным водообменом и интенсивной антропогенной нагрузкой – является сложной динамической экосистемой, где гидрологический, гидрохимический и геохимический режимы формируются под влиянием природных и антропогенных факторов. Известно, что в донных отложениях бухты активно аккумулируется органическое вещество [1].

Функционирование морских экосистем в значительной степени лимитируется доступностью биогенных элементов. Баланс этих элементов регулирует биологическую продуктивность, обуславливает характер биогеохимических циклов и в конечном счете влияет на эволюцию морской среды, поскольку непосредственно определяет масштабы фотосинтеза и деструкции органического вещества [2].

Исследования, посвященные анализу изменчивости содержания минеральных форм биогенных элементов в водах Севастопольской бухты, выполняются в отделе биогеохимии моря Морского гидрофизического института уже более 20 лет [2–5]. В современном исследовании, представленном в работе [2], авторы указывают, что влияние антропогенного фактора на гидрохимический режим бухты преобладает над природными процессами, и отмечают рост концентраций почти всех исследуемых биогенных элементов в 2007–2016 гг.

При оценке уровня антропогенной нагрузки в водных экосистемах одним из наиболее информативных объектов изучения являются донные отложения. Поверхностный слой донных отложений (0–5 см) представляет собой динамичную геохимическую структуру, в которой наиболее интенсивно обмен происходит между твердой и жидкой фазами, а также уже между осадком и водной толщей. Важным параметром, определяющим интенсивность всех протекающих процессов, является окислительно-восстановительный потенциал (Eh). При этом поровые воды также являются одним из ключевых звеньев в трансформации основных биогенных элементов и поддерживают продуктивность морских экосистем. Регенерация и связывание в осадках азота, фосфора и кремния, служащих источником питания для фитопланктона, во многом определяют трофический статус всей водной толщи [13, 14].

Стоит отметить, что изучение потоков биогенных элементов важно для понимания процессов эвтрофикации. Однако, несмотря на систематическое исследование физико-химических характеристик донных отложений (в том числе химического состава поровых вод [11, 12]) и особенностей накопления в них загрязнителей органического и неорганического происхождения [6–10], данные

о количественных характеристиках и особенностях пространственного распределения биогенных элементов в поровых водах отсутствуют.

Целью настоящей работы является оценка особенностей пространственно-временного распределения концентраций биогенных элементов в поровых водах поверхностного слоя донных отложений по современным натурным данным.

Методы и материалы

Характеристика района исследований. Акватория Севастопольской бухты в течение длительного времени является базой военно-морского флота РФ с различной промышленно-производственной и хозяйственной инфраструктурой, а также зоной активного судоходства и проведения гидротехнических работ. Кроме того, на берегах бухты расположена крупная городская агломерация – г. Севастополь. Вследствие этого акватория испытывает чрезвычайно высокий комплексный уровень антропогенной нагрузки, что приводит к нарушению существующих экологических равновесий. Долгое время в бухте добывали и культивировали морепродукты, но сейчас это невозможно в связи с истощением биоресурсов и высоким уровнем загрязнения [3]. В настоящее время бухта относится к числу наиболее загрязненных прибрежных акваторий в Черном море и, согласно модельным оценкам [15], характеризуется низкой самоочистительной способностью.

Гидрологический и гидрохимический режимы Севастопольской бухты являются предметом многолетних исследований [2–5, 15–24] и формируются в результате комплексного взаимодействия ряда факторов: интенсивности водообмена бухты с прилегающей открытой частью Черного моря, особенности циркуляции вод внутри бухты [18, 19], стока р. Черной, поступления ливневых и сточных канализационных вод, а также атмосферных выпадений [3, 4, 16, 21, 22].

Согласно работам [3, 15, 17], наибольшее воздействие на гидрологический режим бухты оказывает ветер. Северные и северо-восточные ветры обуславливают режим блокировки водообмена и накопления загрязняющих веществ. Смена ветра на южный, наоборот, способствует выносу аккумулированных загрязненных вод, в том числе бытовых стоков, в сторону северного побережья Севастопольской бухты [1, 15].

В работах [15, 18, 19] отмечена выраженная двухслойная структура циркуляции вод в бухте: в поверхностном слое (0–5 м) преобладает течение, направленное вглубь бухты вдоль ее северного берега, а в придонном – компенсационное вытекающее течение вдоль южного берега. При этом средние скорости течений в придонном потоке на большей части акватории не превышают 10–15 см/с.

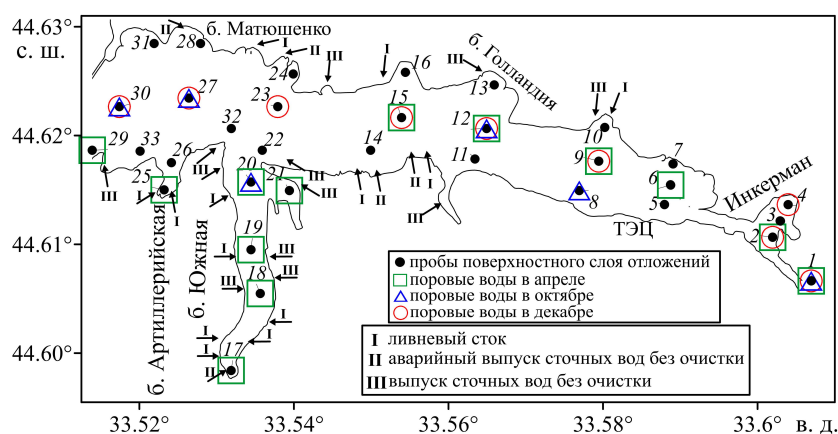
Антициклоническая структура с конвергенцией в центре и подъемом изоповерхностей на периферии формирует в центральной части бухты квазистационарную область, влияющую на динамику вод, распределение гидрохимических параметров и современных донных отложений [25].

В Севастопольской бухте присутствует плотностная стратификация вод, особенно в летний период. Это затрудняет поступление кислорода в придонный слой вод и приводит к формированию гипоксии [3, 23].

Влияние стока р. Черной носит ярко выраженный сезонный и пространственно-ограниченный характер [3, 4, 16, 21]. Пресные речные воды формируют шлейф, распространяющийся в поверхностном слое и создающий дополнительную бароклинную компоненту течений, усиливая горизонтальную неоднородность термохалинных полей [17]. В периоды паводков формируется четко выраженное опресненное течение, распространяющееся вдоль северного берега, что приводит к значительной стратификации и переносу взвешенных веществ в кутовую часть [4, 21]. В периоды межени влияние стока локализовано в вершине бухты [16, 21].

На изменчивость природных процессов дополнительно влияет антропогенный фактор. В первую очередь это выражается в поступлении ливневых и канализационных стоков, выступающих как мощный импульсный фактор и оказывающих более резкое и локальное влияние на гидрохимический режим по сравнению с речным стоком [20]. В работе [24] авторы фиксируют формирование контрастных опресненных шлейфов в местах выпусков ливневой канализации после ливней, что приводит к быстрым и значительным изменениям температуры, солености и мутности воды, а также содержания биогенных элементов в поверхностном слое, избыток которых, в свою очередь, приводит к эвтрофикации водоема, гипоксии и смене структуры планктонных сообществ [3, 16].

Отбор проб. Пробы поверхностного (0–5 см) слоя донных отложений были отобраны с помощью дночерпателя ДЧ-0,025 в рамках ежеквартальных экспедиций отдела биогеохимии моря Морского гидрофизического института РАН на маломерном судне «Гидрограф-4». Всего в различные гидрологические сезоны (весна, осень, зима) было отобрано 32 пробы донных отложений, из которых с использованием центрифуги *Elmi CM-6MT* извлекали



Р и с . 1. Расположение станций отбора донных отложений, а также ливневых и аварийных выпусков сточных вод [20]

F i g . 1. Location of the bottom sediment sampling stations, as well as stormwater and emergency wastewater outlets [20]

поровые воды (количество оборотов – 3000 об/мин, время вращения – 35 мин). Схема станций отбора проб показана на рис. 1.

Величины водородного показателя (pH) и окислительно-восстановительного потенциала (Eh) в пробах донных отложений определяли потенциометрически с использованием иономеров И-160МП, комбинированного электрода *Hanna Instruments HI 10530* (pH) и платинового электрода ЭПВ-1 (Eh).

Анализ гранулометрического состава проводили в два этапа в соответствии с ГОСТ 12536-2014. На первом этапе выполняли мокрое просеивание проб для выделения и количественного гравиметрического учета пелито-алевритовой фракции (частицы менее 0.05 мм). На втором этапе оставшийся материал (фракция более 0.05 мм) высушивали и разделяли методом сухого просеивания на стандартном наборе сит.

Концентрации минеральных форм биогенных элементов определяли фотометрически с использованием спектрофотометра КФК-3КМ и проточного автоматического анализатора биогенных элементов *Scalar San⁺⁺* (Нидерланды) после фильтрации (фильтр 0.45 мкм), за исключением проб для определения ионов аммония¹⁾. Концентрацию кремнекислоты определяли с учетом поправки на соленость¹⁾:

$$C_{\text{ист}} = C_{\text{набл}} \cdot (1 + 0.0045S),$$

где $C_{\text{ист}}$ – истинная концентрация кремнекислоты; $C_{\text{набл}}$ – наблюдаемая концентрация кремнекислоты; S – конечная соленость анализируемой пробы, ЕПС¹⁾.

Аммонийный азот определяли с помощью модифицированного метода Сэджи – Солорзано для морской воды, в основе которого лежит фенол-гипохлоритная реакция с использованием нитропруссиды натрия и цитрата натрия²⁾. Содержание нитритов и суммы нитритов и нитратов определяли согласно методике (РД 52.10.745-2020).

Коэффициенты корреляции и степень их достоверности были рассчитаны с помощью программы *Statistica*. Уровень достоверности полученных коэффициентов корреляции составил 95 %.

Результаты и обсуждение

В Севастопольской бухте преобладают мелкозернистые илы (в среднем ~ 85 %) с максимумом в Южной бухте и глубоководной части на фарватере. Пространственное распределение фракций гранулометрического состава определяется паводковым режимом р. Черной (восточная часть бухты), интенсивным поступлением ливневых и канализационных стоков, являющихся основным источником терригенного взвешенного вещества в центральной части бухты, а также вкладом абразионных процессов в береговой полосе (западная часть бухты). Максимальное содержание ила на фарватере в центральной части бухты связано с большими глубинами в данном районе и особенностями циркуляции вод [25], которые способствуют осаждению тонких частиц

¹⁾ Современные методы гидрохимических исследований океана / под ред. О. К. Бордовского, В. Н. Иваненкова. Москва : ИО АН СССР, 1992. 201 с.

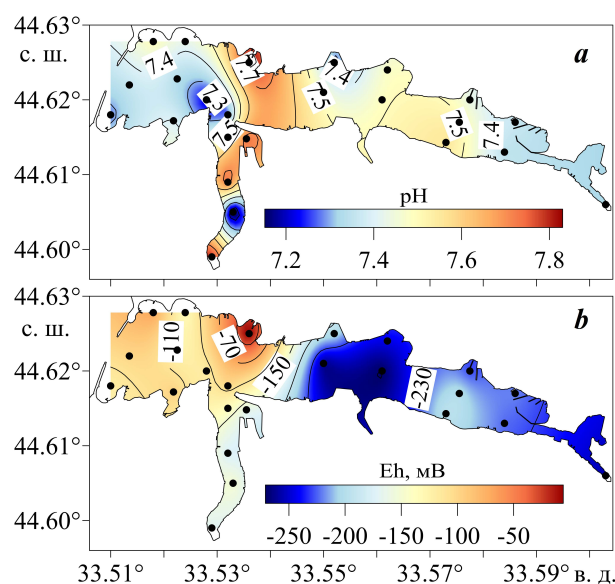
²⁾ Thermodynamic of the carbon dioxide system in seawater. UNESCO, 1987. P. 3–21. (UNESCO technical papers in marine science ; vol. 51).

из-за ослабленного ветро-волнового перемешивания и снижения скорости поступления нового обломочного материала.

Высокое содержание органического углерода (до 5 %) в донных отложениях бухт Южной и Артиллерийской определяется наличием в этих районах большого числа ливневых и аварийных выпусков сточных вод [8, 12]. Минимальное содержание органического углерода 0.5–2.5 % в западной части бухты объясняется поступлением гравийно-песчаного и илистого материала в результате абразионной деятельности [8]. Отсутствие абразионных процессов в центральной части бухты связано с антропогенным преобразованием береговой линии, выражающимся в строительстве бетонных набережных и пирсов [26].

Это способствует формированию в донных отложениях слабощелочных восстановительных условий (рН 7.1–7.8, Eh от 0 до –300 мВ) (рис. 2). В течение года значения рН и Eh изменяются незначительно и в среднем составляют 7.4 и –190 мВ соответственно.

Минимальные значения Eh отложений в центральной части Севастопольской бухты (от –190 до –270 мВ) и в бухте Южной (от –140 до –310 мВ) можно объяснить особенностями седиментации на этих участках (рис. 2, b). В центральной части бухты на максимальных глубинах в условиях низкого водообмена с открытым морем формируется мощный слой мелкодисперсных илистых отложений с повышенной долей органического углерода. Особенности циркуляции [18, 19, 25] препятствуют поступлению кислорода в придонный слой вод [23], в результате чего кислород расходуется в донных отложениях



Р и с . 2. Пространственное распределение значений рН (a) и Eh (b) в поверхностном слое донных отложений Севастопольской бухты

Fig. 2. Spatial distribution of pH (a) and Eh (b) values in the surface layer of the Sevastopol Bay bottom sediments

на окисление органического вещества, а в отложениях формируются анаэробные условия [11]. В Южной бухте аналогичная ситуация осложняется дополнительным поступлением органического вещества с многочисленными канализационными стоками.

Особенности пространственного распределения рН поверхностного слоя отложений также объясняются рядом факторов как природного (тип отложений, локальные источники пресных вод), так и антропогенного (поступление взвешенного вещества и органического углерода с канализационными стоками) происхождения. Слабощелочная среда ($\text{pH} = 7.8$) в районе ст. 24 (рис. 2, а) объясняется песчаным типом отложений, способствующим хорошему водообмену между осадком и придонным слоем вод, а аналогичная слабощелочная среда ($\text{pH} = 7.7\text{--}7.8$) на ст. 17, 20, 21 объясняется уже восстановительными условиями в илистых отложениях Южной бухты, для которых характерен явный запах сероводорода, а Eh достигает -170 мВ (рис. 2, б). Минимальные значения Eh ($-260 \dots -270$ мВ), зафиксированные в центральной части бухты (ст. 12, 15), объясняются особенностями циркуляции вод в бухте (станции расположены на одинаковом удалении от западной части бухты, отличающейся интенсивным водообменом с открытым морем, и от восточной с преобладающим вкладом речного стока), рельефом дна (максимальная глубина на фарватере), а также геохимическим составом донных отложений (преобладает фракция мелкодисперсных илов с повышенным содержанием органического углерода).

Основные источники поступления биогенных элементов в донные отложения бухты имеют смешанное природно-антропогенное происхождение: фосфор и различные формы азота поступают со сточными водами и поверхностным терригенным стоком; кремний в первую очередь имеет природное происхождение и транспортируется с терригенным стоком в результате выветривания, а также может попадать в донные отложения в результате хозяйственной деятельности (например, строительства). Таким образом, большое количество ливневых и сточных водовыпусков, расположенных по периметру всей бухты, является определяющим фактором пространственной неоднородности концентраций исследуемых веществ.

Распределение биогенных элементов в поровых водах верхнего слоя отложений изменяется как в пространстве, так и во времени (в течение года). Диапазоны изменения концентраций нитратов составляют $0\text{--}7.10$ мкМ, нитритов – $0.02\text{--}0.89$ мкМ, аммония – $25.74\text{--}1380.95$ мкМ, фосфатов – $0.20\text{--}94.68$ мкМ и кремнекислоты – $36.04\text{--}628.09$ мкМ (рис. 3–6).

Для сравнения в работе [2] показаны диапазоны изменения концентрации биогенных элементов в водах бухты в 2007–2016 гг.: нитратов – $0\text{--}286.35$ мкМ, нитритов – $0\text{--}6.37$ мкМ, аммония – $0\text{--}40.70$ мкМ, фосфатов – $0\text{--}5.20$ мкМ и кремнекислоты – $0\text{--}97.98$ мкМ.

Физико-химические характеристики отложений – слабощелочные восстановительные условия (низкие значения рН, значения Eh ниже -100) и повышенное содержание органического углерода – во многом определяют особенности разложения органического вещества и связанную с ним трансформацию биогенных элементов.

В целом концентрации нитратов в поровых водах чрезвычайно низкие и в среднем на порядок ниже, чем в придонном и поверхностном слоях вод [2]. Так, средние концентрации нитратов в поровых водах минимальны в апреле (0.37 мкМ), в октябре они возрастают до 1.42 мкМ, а в декабре достигают максимальных значений (3.61 мкМ). Это объясняется тем, что в восстановленных отложениях при высоких отрицательных значениях Eh денитрификация уже не происходит. При этом сохраняется внутригодовая изменчивость величин, которую авторы [2] связывают с усилением вертикального перемешивания в осенне-зимний период, а также с уменьшением световой активности. Это подтверждается ростом концентраций нитратов в западной, наиболее гидродинамически активной части бухты (рис. 3).

С другой стороны, для данного диапазона значений Eh и pH осадка характерно активное протекание аммонификации, включающее разложение органического вещества с высвобождением аммония (NH_4^+). Это подтверждается высокими значениями (в среднем от 139.64 мкМ в апреле до 543 мкМ в октябре) концентраций ионов аммония в поровых водах (рис. 4), на несколько порядков

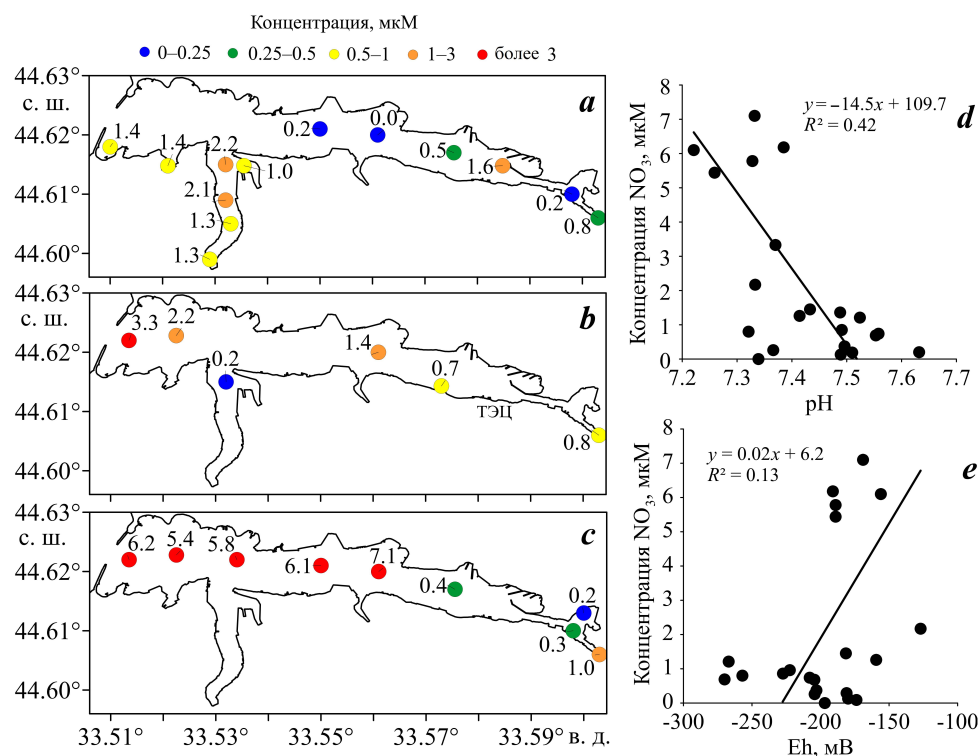


Рис. 3. Концентрации нитратов в поровых водах Севастопольской бухты в апреле (а), октябре (б), декабре (в) 2024 г., а также соотношение концентраций нитратов с характеристиками твердой фазы отложений pH (д) и Eh (е)

Fig. 3. Nitrate concentrations in pore waters of the Sevastopol Bay sediments in April (a), October (b), December (c) 2024, as well as the ratio of nitrate concentrations to the characteristics of the sediments solid phase (d) pH and (e) Eh

превышающими концентрации этого соединения в поверхностном и придонном слоях вод [2].

Для анаэробных условий также характерен анаммокс, то есть анаэробное окисление аммония, которое имеет большое значение для понимания баланса азота в донных отложениях и потоков нитратов/нитритов [27].

Максимальная концентрация аммонийного азота в поровых водах (1380.95 мкМ) была отмечена на ст. 8 (рис. 4), расположенной в районе сброса локальных очистных сооружений вблизи ТЭЦ (рис. 1), что согласуется с отмеченными в работе [2] максимальными концентрациями аммония в придонном слое вод. Повышенная концентрация (1185.33 мкМ) элемента была отмечена также на ст. 1, расположенной на границе геохимического барьера река – бухта. Для этого участка характерно повышенное накопление мелкозернистой пелитовой фракции (доля ила – 98 %), минерализация органического вещества (содержание $C_{\text{орг}}$ более 2 % [8, 12]) и продукция углекислого газа, сопровождающаяся увеличением содержания $p\text{CO}_2$ в воде [4]. Для таких отложений,

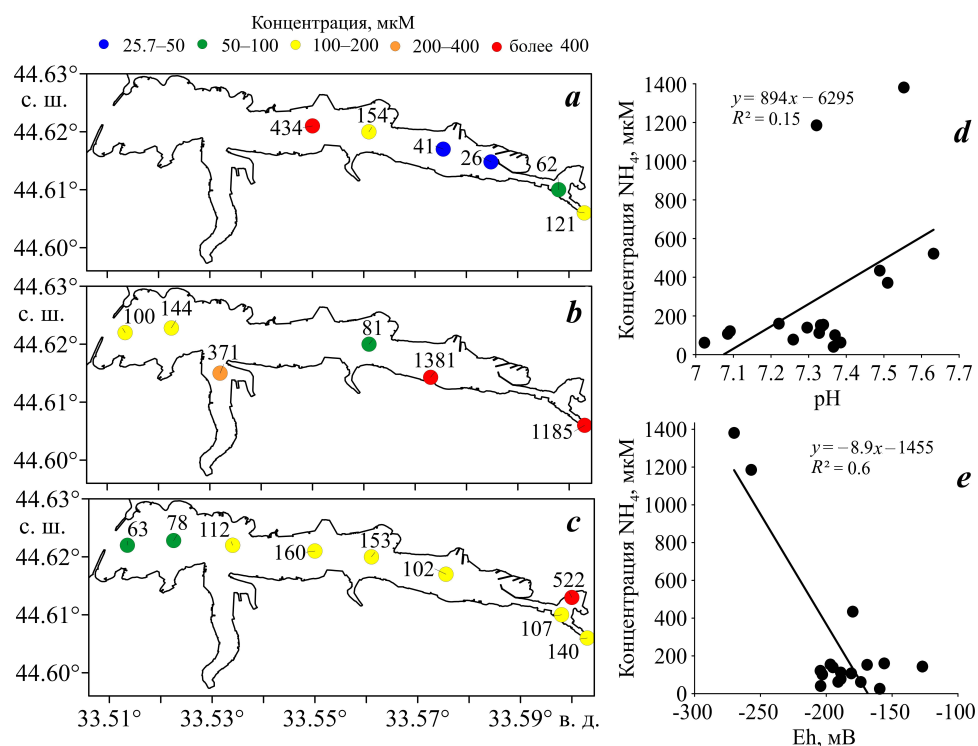


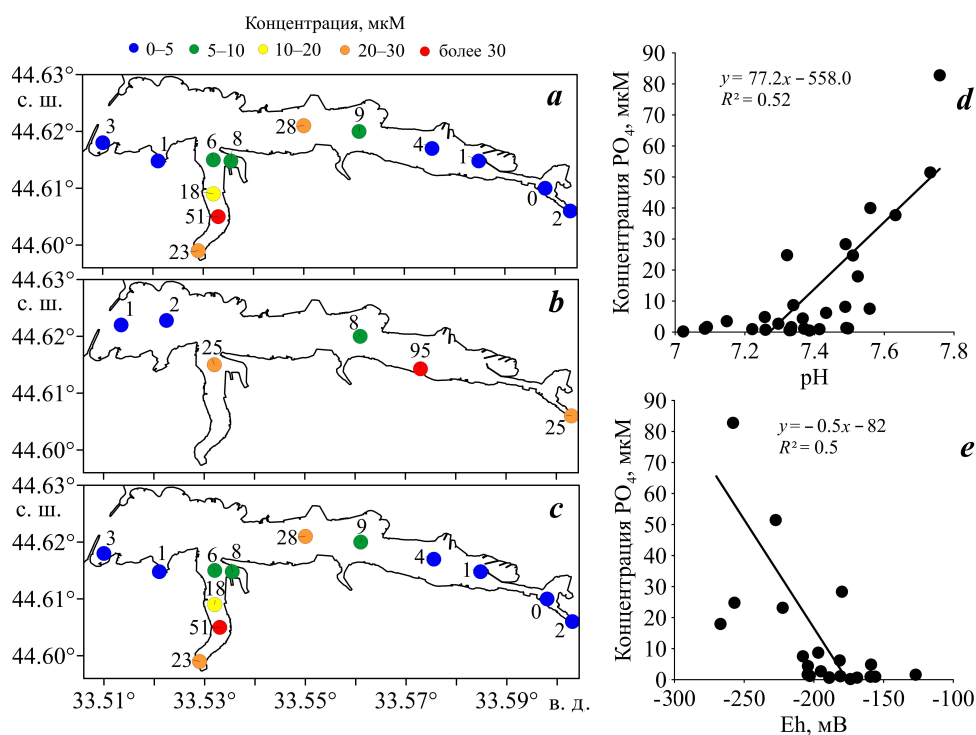
Рис. 4. Концентрации аммонийного азота в поровых водах Севастопольской бухты в апреле (а), октябре (б), декабре (с) 2024 г., а также соотношение концентраций аммонийного азота с характеристиками твердой фазы отложений pH (д) и Eh (е)

Fig. 4. Ammonium concentrations in pore waters of the Sevastopol Bay sediments in April (a), October (b), December (c) 2024, as well as the ratio of ammonium nitrogen concentrations to the characteristics of the sediments solid phase (d) pH and (e) Eh

характеризующихся черным цветом, интенсивным гнилостным запахом, низким значением Eh (-257 мВ), обогащенных органическим веществом, отмечаются бескислородные условия [11]. Это приводит к тому, что в условиях гипоксии денитрификация и аммонификация становятся доминирующими путями трансформации азота, а нитрификация минимизируется [13]. Это подтверждается высокой статистически значимой отрицательной корреляцией концентрации аммония с величиной Eh отложений ($r = -0,8$, $n = 21$, $p < 0.05$).

В восстановительной среде илистых осадков Севастопольской бухты активная сорбция фосфора может происходить на частицах железа, марганца и алюминия. Подобные процессы наблюдаются в восстановленных отложениях крупного, антропогенно нагруженного Онежского озера [28]. При переходе к анаэробным условиям (что типично для донных отложений бухты) оксиды железа восстанавливаются ($\text{Fe}^{3+} \rightarrow \text{Fe}^{2+}$), происходит их растворение и массовое высвобождение связанного фосфора в поровые воды [28–30].

Средние концентрации фосфатов в поровых водах ($11.91\text{--}25.84$ мкМ) значительно выше, чем в придонном и поверхностном горизонтах вод бухты [2].



Р и с . 5 . Концентрации фосфатов в поровых водах Севастопольской бухты в апреле (a), октябре (b), декабре (c) 2024 г., а также соотношение концентраций фосфатов с характеристиками твердой фазы отложений pH (d) и Eh (e)

Fig. 5. Phosphorus concentrations in pore waters of the Sevastopol Bay sediments in April (a), October (b), December (c) 2024, as well as the ratio of phosphorus concentrations to the characteristics of the sediments solid phase pH (d) and Eh (e)

Максимальные средние концентрации фосфатов в поровых водах отмечаются в октябре (25.84 мкМ), минимальные – в апреле (11.91 мкМ) (рис. 5). Это обусловлено влиянием гидрологических параметров вод, в первую очередь температуры, в результате которого скорость химических реакций замедляется. Кроме того, для осенне-зимнего периода характерно перемешивание водной толщи, в связи с чем максимальные концентрации в придонном и поверхностном слоях вод наблюдаются в декабре [2]. Повышенные концентрации фосфатов (18–83 мкМ) в течение исследуемого периода отмечаются преимущественно в отложениях Южной бухты, а в октябре – также в районе ст. 8 (95 мкМ), расположенной вблизи ТЭЦ (рис. 5). В декабре концентрации фосфатов в поровых водах отложений Южной бухты на два порядка выше значений, полученных для района фарватера в центральной части Севастопольской бухты. Это объясняется дополнительным поступлением биогенных элементов с ливневыми и канализационными стоками, а также ограниченным водообменом в южной и центральной частях Южной бухты. Корреляция между концентрациями фосфатов и величиной pH отложений: $r = 0.7$, $n = 31$, $p < 0.05$, а между концентрациями фосфатов и величиной Eh: $r = -0.7$, $n = 31$, $p < 0.05$.

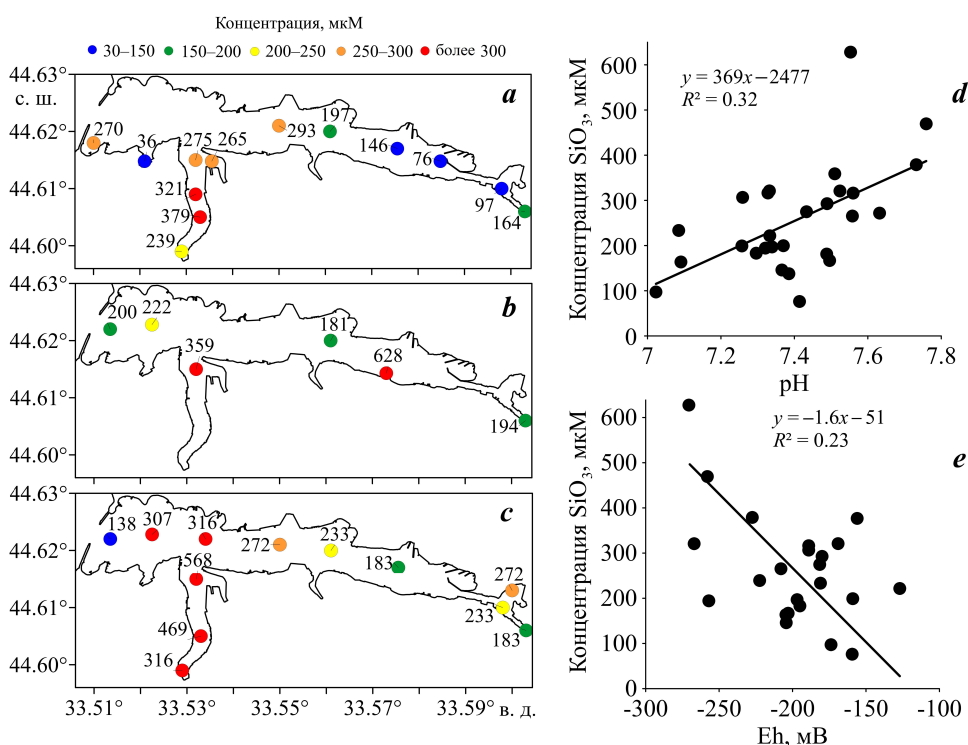


Рис. 6. Концентрации кремнекислоты в поровых водах Севастопольской бухты в апреле (a), октябре (b), декабре (c) 2024 г., а также соотношение концентраций кремнекислоты и характеристик твердой фазы отложений pH (d) и Eh (e)

Fig. 6. Silicon concentrations in pore waters of the Sevastopol Bay sediments in April (a), October (b), December (c) 2024, as well as the ratio of silicon concentrations to the characteristics of the sediments solid phase pH (d) and Eh (e)

В поровых водах Севастопольской бухты концентрация кремнекислоты (21.14–297.30 мкМ), подобно фосфатам, значительно (на несколько порядков) выше, чем в придонном и поверхностном слоях вод. Концентрации кремнекислоты в поровых водах минимальны весной, возрастают летом и достигают своего максимума осенью и зимой. Основными источниками поступления кремния являются речной и ливневый стоки, что объясняет повышенные концентрации элемента, отмеченные для Южной бухты (239–568 мкМ), сохраняющиеся в течение всего года, и низкие значения, наблюдаемые на фарватере (76–293 мкМ) и в западной части бухты (138–307 мкМ) (рис. 6).

Окислительно-восстановительные условия не оказывают прямого влияния на растворимость кремнекислоты, в отличие от фосфора. Однако в анаэробных условиях в результате активного протекания сульфатредукции pH и общая щелочность повышаются [31, 32]. Интенсивность сульфатредукции определяется количеством и доступностью органического вещества, которое служит субстратом-донором электронов [33]. В ходе окисления сульфат-ионы восстанавливаются до сульфидов, а органический углерод переходит в неорганическую форму. Вследствие данной реакции появляются бикарбонат-ионы и расходуются протоны, что закономерно приводит к повышению как общей щелочности, так и значений pH в поровых водах. Этот опосредованный механизм ускорения растворения кремнезема в щелочных условиях был количественно подтвержден в экспериментальных и полевых исследованиях [34].

Статистически значимая положительная корреляция между концентрацией кремнекислоты и pH отложений ($r = 0.6$, $n = 31$, $p < 0.05$), а также отрицательная ($r = -0.5$, $n = 31$, $p < 0.05$) – между концентрацией кремнекислоты и величиной Eh подтверждают ведущую роль этого механизма. Таким образом, сульфатредукция выступает мощным биохимическим катализатором: создавая щелочные условия, она существенно ускоряет растворение кремнийсодержащих соединений, что в итоге и обуславливает высокие концентрации кремнекислоты в поровых водах анаэробных осадков.

Заключение

Таким образом, комплекс природных и антропогенных факторов, включая слабый водообмен, особенности очертания береговой линии, речной сток, а также поступление ливневых и хозяйственно-бытовых вод, формирует в донных отложениях бухты специфическую окислительно-восстановительную обстановку. Именно эта обстановка является первичным фактором, определяющим направление, последовательность и интенсивность всех протекающих в осадках химических и микробиологических процессов.

Анализ химического состава поровых вод выявил резкий контраст в распределении биогенных элементов между донными отложениями и водной толщей.

Концентрации лабильных форм азота (нитраты и нитриты) в поровых водах оказались ниже, чем в придонной и тем более поверхностной воде. Низкое содержание нитратов и нитритов свидетельствует о почти полном отсутствии кислорода и активной денитрификации в отложениях, где эти соединения используются в качестве альтернативных окислителей (акцепторы электронов) для разложения большого количества органического вещества.

Напротив, концентрации аммония, фосфатов и кремнекислоты в поровых водах донных отложений были на один-два порядка выше, чем в воде. Высокие концентрации аммония являются следствием анаэробной минерализации (аммонификации) азотсодержащего органического вещества. Фосфаты аккумулируются в результате высвобождения из железо-оксигидроксидных комплексов, которые теряют сорбционную способность в восстановительных условиях. Высокое содержание кремнекислоты подтверждает интенсивное растворение биогенного кремнезема, характерное для анаэробных донных отложений.

Пространственная неоднородность в распределении биогенных элементов является прямым отражением диагенетических процессов, протекающих в отложениях, и их ключевой роли в экосистеме. Эта неоднородность также может указывать на формирование в отложениях мощных градиентов концентрации (направленных для аммония, фосфатов и кремнекислоты из осадка в воду) и обуславливать постоянный диффузионный поток этих биогенных элементов в придонный слой. Этот процесс может не только поддерживать продуктивность фитопланктона в периоды сокращения внешнего стока, но и способствовать возникновению эвтрофикации даже после технического снижения прямой антропогенной нагрузки на акваторию.

В результате илистые, богатые органическим углеродом отложения в слабощелочных восстановительных условиях могут выступать не только в качестве пассивного хранилища всех поступающих веществ, но и в роли биогеохимического реактора – важного звена круговорота элементов в морских экосистемах.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Гурова Ю. С., Якушев Е. В., Березина А. В., Новиков М. О. и др. Численное моделирование динамики окислительно-восстановительных условий на границе вода – донные отложения в Севастопольской бухте // Экологическая безопасность прибрежной и шельфовой зон моря. 2023. № 2. С. 71–90. EDN RIPXZQ. <https://doi.org/10.29039/2413-5577-2023-2-71-90>
2. Орехова Н. А., Вареник А. В. Современный гидрохимический режим Севастопольской бухты // Морской гидрофизический журнал. 2018. Т. 34, № 2. С. 134–146. EDN YNHCQP. <https://doi.org/10.22449/0233-7584-2018-2-134-146>
3. Иванов В. А., Овсяный Е. И., Репетин Л. Н., Романов А. С. и др. Гидролого-гидрохимический режим Севастопольской бухты и его изменения под воздействием климатических и антропогенных факторов. Севастополь : МГИ НАНУ, 2006. 90 с. EDN YRIOUU.
4. Орехова Н. А., Медведев Е. В., Овсяный Е. И. Влияние вод реки Черной на гидрохимический режим Севастопольской бухты (Черное море) // Экологическая безопасность прибрежной и шельфовой зон моря. 2018. № 3. С. 84–91. EDN YLLQIH. <https://doi.org/10.22449/2413-5577-2018-3-84-91>
5. Мыслина М. А., Вареник А. В., Тарасевич Д. В. Динамика концентрации биогенных элементов в водах реки Черной (Крымский полуостров) в 2015–2020 годах // Морской гидрофизический журнал. 2024. Т. 40, № 3. С. 438–449. EDN UGRJUT.
6. Егоров В. Н., Гулин С. Б., Малахова Л. В., Мирзоева Н. Ю. и др. Нормирование качества вод Севастопольской бухты по потокам депонирования загрязняющих веществ в донные отложения // Водные ресурсы. 2018. Т. 45, № 2. С. 188–195. EDN VZHWGD. <https://doi.org/10.7868/S0321059618020086>

7. Малахова Л. В., Лобко В. В., Малахова Т. В., Мурашова А. И. Сравнительная оценка хлорорганического загрязнения донных отложений разнотипных водных объектов Севастопольского региона (Крым) // *Химия в интересах устойчивого развития*. 2022. Т. 30, № 2. С. 174–185. EDN JHJBTB. <https://doi.org/10.15372/KhUR2022371>
8. Гуров К. И., Котельянец Е. А. Распределение Cr, Cu, Ni, Pb, Zn, Sr, Ti, Mn, Fe в донных отложениях Севастопольской бухты (Черное море) // *Морской гидрофизический журнал*. 2022. Т. 38, № 5. С. 512–529. EDN IOYNEZ.
9. Соловьева О. В., Тихонова Е. А. Динамика содержания органического вещества в донных отложениях портовых акваторий Севастополя // *Ученые записки Крымского федерального университета имени В.И. Вернадского. Биология. Химия*. 2018. Т. 4, № 4. С. 196–206. EDN YTABLV.
10. Параскив А. А., Терещенко Н. Н., Проскурнин В. Ю., Чужикова-Проскурнина О. Д. Изменение седиментационных потоков плутония в донные отложения бухты Севастопольская в период до и после аварии на ЧАЭС // *Морской биологический журнал*. 2021. Т. 6, № 2. С. 69–82. EDN FLZPKG. <https://doi.org/10.21072/mbj.2021.06.2.05>
11. Орехова Н. А., Коновалов С. К. Кислород и сероводород в донных осадках Севастопольской бухты // *Экологическая безопасность прибрежной и шельфовой зон и комплексное использование ресурсов шельфа*. 2009. Вып. 18. С. 48–56. EDN YMIJGF.
12. Орехова Н. А., Коновалов С. К. Кислород и сульфиды в донных отложениях прибрежных районов Севастопольского региона Крыма // *Океанология*. 2018. Т. 58, № 5. С. 739–750. EDN XWVHWX. <https://doi.org/10.1134/S0030157418050106>
13. Middelburg J. J., Levin L. A. Coastal hypoxia and sediment biogeochemistry // *Biogeosciences*. 2009. Vol. 6, No 7. P. 1273–1293. EDN NAPTGL. <https://doi.org/10.5194/bg-6-1273-2009>
14. Seitzinger S., Harrison J. A., Böhlke J. K., Bouwman A. F. et al. Denitrification across landscapes and waterscapes: A synthesis // *Ecological Applications*. 2006. Vol. 16, No. 6. P. 2064–2090. EDN MHOPER. [https://doi.org/10.1890/1051-0761\(2006\)016\[2064:DALAWA\]2.0.CO;2](https://doi.org/10.1890/1051-0761(2006)016[2064:DALAWA]2.0.CO;2)
15. Совга Е. Е., Мезенцева И. В., Хмара Т. В. Моделирование сезонной изменчивости гидродинамического режима Севастопольской бухты и оценки самоочистительной способности ее экосистемы // *Фундаментальная и прикладная гидрофизика*. 2022. Т. 15. № 2. С. 110–123. EDN AWWRNH. <https://doi.org/10.48612/fpg/92ge-ahz6-n2pt>
16. Овсяный Е. И., Артеменко В. М., Романов А. С., Орехова Н. А. Сток реки Черной, как фактор формирования водно-солевого режима и экологического состояния Севастопольской бухты // *Экологическая безопасность прибрежной и шельфовой зон и комплексное использование ресурсов шельфа*. 2007. № 15. С. 57–65. EDN YMTPSY.
17. Михайлова Э. Н., Шапиро Н. Б. Моделирование циркуляции и пространственной структуры термохалинных полей в Севастопольской бухте с учетом реальных внешних данных (зима 1997 г.) // *Морской гидрофизический журнал*. 2005. № 2. С. 60–76. EDN YUFBYT.
18. Морозов А. Н., Лемешко Е. М., Шутков С. А., Зима В. В. Течения в Севастопольской бухте по данным ADCP-наблюдений (июнь 2008 года) // *Морской гидрофизический журнал*. 2012. № 3. С. 31–43. EDN TMJXDX.
19. Лемешко Е. М., Морозов А. Н., Шутков С. А., Зима В. В. и др. Течения в Севастопольской бухте по данным ADCP-наблюдений, ноябрь 2014 г. // *Экологическая безопасность прибрежной и шельфовой зон и комплексное использование ресурсов шельфа*. 2014. Вып. 28. С. 25–30. EDN VBFSNL.

20. Грузинов В. М., Дьяков Н. Н., Мезенцева И. В., Мальченко Ю. А. и др. Источники загрязнения прибрежных вод Севастопольского района // *Океанология*. 2019. Т. 59, № 4. С. 579–590. EDN VEOVBB. <https://doi.org/10.31857/S0030-1574594579-590>
21. Совга Е. Е., Хмара Т. В. Влияние стока реки Черной в периоды паводка и межени на экологическое состояние кутовой части акватории Севастопольской бухты // *Морской гидрофизический журнал*. 2020. Т. 36. № 1. С. 31–40. EDN NNGSDX. <https://doi.org/10.22449/0233-7584-2020-1-31-40>
22. Вареник А. В. Соединения азота и фосфора в атмосферных выпадениях г. Севастополя в 2015–2023 годах // *Морской гидрофизический журнал*. 2025. Т. 41, № 1. С. 50–65. EDN DWHUBR.
23. Кондратьев С. И., Видничук А. В. Локальная сезонная гипоксия и образование сероводорода в придонных водах Севастопольской бухты в 2009–2019 годах // *Экологическая безопасность прибрежной и шельфовой зон моря*. 2020. № 2. С. 107–212. EDN EDXBJU. <https://doi.org/10.22449/2413-5577-2020-2-107-121>
24. Багаев А. В., Никишин В. В., Рауэн Т. В., Вержевская Л. В. и др. Локальные изменения физико-биологических параметров поверхностных вод Севастопольской бухты под влиянием ливневого стока // *Морской гидрофизический журнал*. 2022. Т. 38, № 2. С. 165–184. EDN DTNJC. <https://doi.org/10.22449/0233-7584-2022-2-165-184>
25. Санитарно-биологические исследования прибрежных акваторий юго-западного Крыма в начале XXI века / под ред. О. Г. Миронова, С. В. Алёмова. Симферополь : ИТ «АРИАЛ», 2018. 276 с. EDN YTQSUP. <https://doi.org/10.21072/978-5-907118-89-8>
26. Горячкин Ю. Н., Ефремова Т. В. Антропогенное воздействие на литодинамику черноморского побережья Крымского полуострова // *Экологическая безопасность прибрежной и шельфовой зон моря*. 2022. № 1. С. 6–30. EDN KQHPN. <https://doi.org/10.22449/2413-5577-2022-1-6-30>
27. Thamdrup B., Dalsgaard T. Production of N₂ through anaerobic ammonium oxidation coupled to nitrate reduction in marine sediments // *Applied and Environmental Microbiology*. 2002. Vol. 68, iss. 3. P. 1312–1318. <https://doi.org/10.1128/AEM.68.3.1312-1318.2002>
28. Белкина Н. А. Фосфор в донных отложениях Онежского озера // *Известия Российского государственного педагогического университета им. А. И. Герцена*. 2015. № 173. С. 97–109. EDN TKIUVL.
29. Белкина Н. А., Субетто Д. А., Ефременко Н. А., Потахин М. С. и др. Химический состав донных отложений северной части Ладожского озера как показатель многолетней изменчивости экосистемы водоема // *Труды Карельского научного центра Российской академии наук*. 2015. № 9. С. 53–61. EDN UMMFWD. <https://doi.org/10.17076/lim51>
30. Савенко В. С., Савенко А. В. Геохимия фосфора в глобальном гидрологическом цикле. Москва : ГЕОС, 2007. 248 с. EDN QKHKWT.
31. Boudreau B. P., Canfield D. E. A comparison of closed- and open-system models for porewater pH and calcite-saturation state // *Geochimica et Cosmochimica Acta*. 1993. Vol. 57, iss. 2. P. 317–334. [https://doi.org/10.1016/0016-7037\(93\)90434-x](https://doi.org/10.1016/0016-7037(93)90434-x)
32. Van Cappellen P., Wang Y. Cycling of iron and manganese in surface sediments; a general theory for the coupled transport and reaction of carbon, oxygen, nitrogen, sulfur, iron, and manganese // *American Journal of Science*. 1996. Vol. 296, iss. 3. P. 197–243. <https://doi.org/10.2475/ajs.296.3.197>
33. Jørgensen B. B., Kasten S. Sulfur cycling and methane oxidation // *Marine Geochemistry*. Berlin ; Heidelberg : Springer, 2006, P. 271–309. EDN SSAQON. https://doi.org/10.1007/3-540-32144-6_8

34. Van Cappellen P., Qiu L. Biogenic silica dissolution in sediments of the Southern Ocean. II. Kinetics // Deep Sea Research Part II: Topical Studies in Oceanography. 1997. Vol. 44, iss. 5. P. 1129–1149. EDN XZTJSQ. [https://doi.org/10.1016/s0967-0645\(96\)00112-9](https://doi.org/10.1016/s0967-0645(96)00112-9)

Поступила 30.03.2026 г.; одобрена после рецензирования 20.04.2026 г.; принята к публикации 30.06.2026 г.; опубликована 30.09.2026 г.

Об авторах:

Гуров Константин Игоревич, научный сотрудник, отдел биогеохимии моря, Морской гидрофизический институт РАН (299011, Россия, г. Севастополь, ул. Капитанская, д. 2), кандидат географических наук, **ORCID ID: 0000-0003-3460-9650**, **Scopus Author ID: 57200248245**, **ResearcherID: L-7895-2017**, **SPIN-код: 5962-7697**, gurovki@gmail.com

Вареник Алла Валерьевна, старший научный сотрудник, отдел биогеохимии моря, Морской гидрофизический институт РАН (299011, Россия, г. Севастополь, ул. Капитанская, д. 2), кандидат географических наук, **SPIN-код: 3277-7914**, **ORCID ID: 0000-0001-5033-4576**, **ResearcherID: H-1880-2014**, **Scopus Author ID: 56960448000**, alla.varenik@mhi-ras.ru

Мыслина Мария Андреевна, младший научный сотрудник, отдел биогеохимии моря, Морской гидрофизический институт РАН (299011, Россия, г. Севастополь, ул. Капитанская, д. 2), **ORCID ID: 0000-0002-0054-0379**, **SPIN-код: 1309-1787**, myslina@mhi-ras.ru

Заявленный вклад авторов:

Гуров Константин Игоревич – отбор проб, формулирование целей и задач исследования, анализ и синтез результатов исследования, подготовка графических и текстовых материалов, написание первоначального варианта статьи

Вареник Алла Валерьевна – общее научное руководство исследованием, подготовка данных, обсуждение результатов работы, доработка текста

Мыслина Мария Андреевна – обработка данных, участие в обсуждении материалов статьи

Все авторы прочитали и одобрили окончательный вариант рукописи.