

Окислительно-восстановительные условия и характеристики донных отложений бухт Севастопольского региона

Ю. С. Куринная*, К. И. Гуров, И. А. Забегаев, Н. А. Орехова

Морской гидрофизический институт РАН, Севастополь, Россия

**e-mail: kurinnaya-jul@yandex.ru*

Аннотация

Цель работы – оценить окислительно-восстановительные условия в донных отложениях Камышовой бухты по сравнению с другими бухтами Севастопольского региона, изучить геохимические характеристики донных отложений и химического состава поровых вод. Проанализированы данные, полученные в ходе экспедиционных исследований на НИС «Виктория» в июле 2021 г. С помощью полярографического метода анализа с использованием стеклянного Au-Hg-микроэлектрода получены натурные данные вертикального распределения кислорода, сероводорода, окисленных и восстановленных форм железа в поровых водах Камышовой бухты в летний сезон. Определены геохимические характеристики донных отложений: гранулометрический состав, содержание органического углерода. Рассмотрены особенности их пространственного и вертикального распределения. Гранулометрический состав осадков в бухте разнообразен. В верховье бухты отложения представлены ракушечным гравием и песком, а в центральной и южной частях преобладают алевритовые и пелитовые илы. Содержание органического углерода в поверхностном слое донных отложений Камышовой бухты изменяется от 0.3 до 2.2 % сухой массы при среднем значении 1.2 % сухой массы, что ниже, чем в других бухтах Севастопольского региона. Установлено, что основные характеристики поровых вод определялись процессами с участием растворенных форм железа (Fe (II, III)) и сероводорода. В верхнем слое отложений отмечены субкислородные условия, что указывает на развитие дефицита кислорода и формирование зон экологического риска экосистемы бухты.

Ключевые слова: донные отложения, поровые воды, кислород, полярография, гранулометрический состав, органический углерод, Черное море, Камышова бухта

Благодарности: работа выполнена в рамках государственного задания ФГБУН ФИЦ МГИ по теме № 0555-2021-0005 «Прибрежные исследования», а также при поддержке проекта РФФИ № 20-35-90103 «Факторы, определяющие потоки кислорода и сероводорода на границе вода – донные отложения в морских экосистемах».

Для цитирования: Окислительно-восстановительные условия и характеристики донных отложений бухт Севастопольского региона / Ю. С. Куринная [и др.] // Экологическая безопасность прибрежной и шельфовой зон моря. 2022. № 1. С. 42–54. doi:10.22449/2413-5577-2022-1-42-54

© Куринная Ю. С., Гуров К. И., Забегаев И. А., Орехова Н. А., 2022



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

Redox Conditions and Characteristics of Bottom Sediments in the Bays of the Sevastopol Region

Yu. S. Kurinnaya*, K. I. Gurov, I. A. Zabegaev, N. A. Orekhova

Marine Hydrophysical Institute of RAS, Sevastopol, Russia

**e-mail: kurinnaya-jul@yandex.ru*

Abstract

The paper aims at assessing redox conditions in the bottom sediments of Kamyshovaya Bay in comparison with those in other bays of the Sevastopol region, and at studying the geochemical characteristics of bottom sediments and the chemical composition of pore waters. The data obtained during expedition research onboard the R/V *Victoria* in July 2021 were analyzed. Using the polarographic method of analysis with the use of a glass Au-Hg microelectrode experimental data were obtained on the vertical distribution of oxygen, hydrogen sulfide, oxidized and reduced forms of iron in the pore waters of Kamyshovaya Bay in summer. Geochemical characteristics of bottom sediments were determined, such as particle size distribution and organic carbon content. The peculiarities of their spatial and vertical distribution were considered. The particle size distribution of sediments in the bay varies. In the upper part of the bay, sediments are represented by shell gravel and sand, and in the central and southern parts, aleurite and pelite silts prevail. The content of organic carbon in the surface layer of Kamyshovaya Bay bottom sediments ranges from 0.3 to 2.2 % dry weight, with an average value of 1.2 % dry weight, which is lower than in other bays of the Sevastopol region. It was found that the main characteristics of pore waters were determined by processes involving dissolved forms of iron (Fe (II, III)) and hydrogen sulfide. In the upper layer of sediments, suboxic conditions were noted, which indicates the development of oxygen deficiency and formation of ecological risk zones for the bay ecosystem.

Keywords: bottom sediments, pore waters, oxygen, polarographic analysis, particle size distribution, organic carbon, Black Sea, Kamyshovaya Bay

Acknowledgements: the work was carried out under state assignment on topic no. 0555-2021-0005 “Complex interdisciplinary research of oceanologic processes, which determine functioning and evolution of the Black and Azov Sea coastal ecosystems” of FSBSI FRC MHI of RAS and supported by RFBR grant no. 20-35-90103.

For citation: Kurinnaya, Yu.S., Gurov, K.I., Zabegaev, I.A. and Orekhova, N.A., 2022. Redox Conditions and Characteristics of Bottom Sediments in the Bays of the Sevastopol Region. *Ecological Safety of Coastal and Shelf Zones of Sea*, (1), pp. 42–54. doi:10.22449/2413-5577-2022-1-42-54

Введение

Донные отложения представляют собой термодинамически неравновесную систему с некоторым запасом энергии, в общем случае определяемым содержанием органического вещества (ОВ) и процессами его трансформации¹⁾. В зоне сопряжения вода – дно наблюдаются значительные градиенты концентрации веществ, формируются потоки веществ, которые зависят от условий и характеристик как придонного слоя вод, так и самих донных

¹⁾ Химия океана. Т. 2 : Геохимия донных осадков / Отв. ред. И. И. Волков. М. : Наука, 1979. 536 с.

отложений. В наибольшей степени это касается кислорода и сероводорода. Они являются определяющими веществами при исследовании особенностей формирования окислительно-восстановительных условий среды, а также компонентами, обуславливающими возможность и условия существования бентосных организмов [1]. Следует отметить, что сероводород является каталитическим ядом и приводит к угнетению дыхания и гибели бентосных организмов [2].

Известно, что растворенный кислород из поверхностного слоя вод поступает в придонный слой вод и донные отложения вследствие процессов адвекции и диффузии. Если скорость его потребления в процессах окисления превышает скорость его поступления, развивается дефицит кислорода [3]. При этом протекание и интенсивность биогеохимических процессов, связанных с вовлечением кислорода, в первую очередь зависят от геохимических характеристик донных отложений (содержание органического углерода и гранулометрический состав осадков) [4]. Расход кислорода на дыхание микроорганизмов, а также его вовлечение в биогеохимические процессы с участием ОВ и других восстановленных соединений приводит к тому, что процесс анаэробного окисления ОВ может стать преобладающим.

Соответственно, в верхнем слое донных осадков появляются восстановленные формы азота, металлов и серы, формируются зоны аноксии [5]. Таким образом, химический состав поровых вод отражает биогеохимические процессы, протекающие в донных отложениях [6].

Увеличение числа прибрежных экосистем, в донных отложениях и придонном слое вод которых наблюдается дефицит кислорода, связано в первую очередь с увеличением потока ОВ вследствие антропогенной деятельности [7].

Камышовая бухта – характерный пример морской прибрежной экосистемы, подверженной антропогенному воздействию. На ее берегах расположен Севастопольский морской рыбный порт, нефтяной терминал, два постоянно действующих и один аварийный выпуски сточных вод, стоки ливневой канализации, цементный завод, котельная, многоэтажная застройка [8, 9]. Заградительный мол на входе в бухту затрудняет водообмен с открытой частью моря и способствует накоплению загрязняющих веществ, в том числе и органического углерода, в донных отложениях.

На протяжении многих лет сотрудники Института биологии южных морей РАН (ИнБИОМ, Севастополь) изучают экосистему Камышовой бухты. В работах [9, 10] исследованы основные гидрологические характеристики вод и геохимические характеристики осадка, приводятся оценки содержания хлороформ-экстрагируемых веществ (ХЭВ) и углеводородов в поверхностном слое донных отложений бухты. Установлено, что натуральная влажность в донных отложениях Камышовой бухты изменялась от 28 до 52 %, ее величина была близка к показателям Севастопольской бухты. Окисленные условия (E_h от +276 мВ) в песках устья бухты сменялись восстановленными (E_h до –59 мВ) в илах центральной части, а рН колебался от 7.3 до 8.3. Однако большая часть поверхностного слоя донных отложений характеризуется окисленными условиями. Загрязнение донных осадков ХЭВ и нефтепродуктами отмечено в центральной части бухты, при этом значения

их концентраций здесь на порядок ниже, чем в других бухтах Севастопольского региона [9, 10].

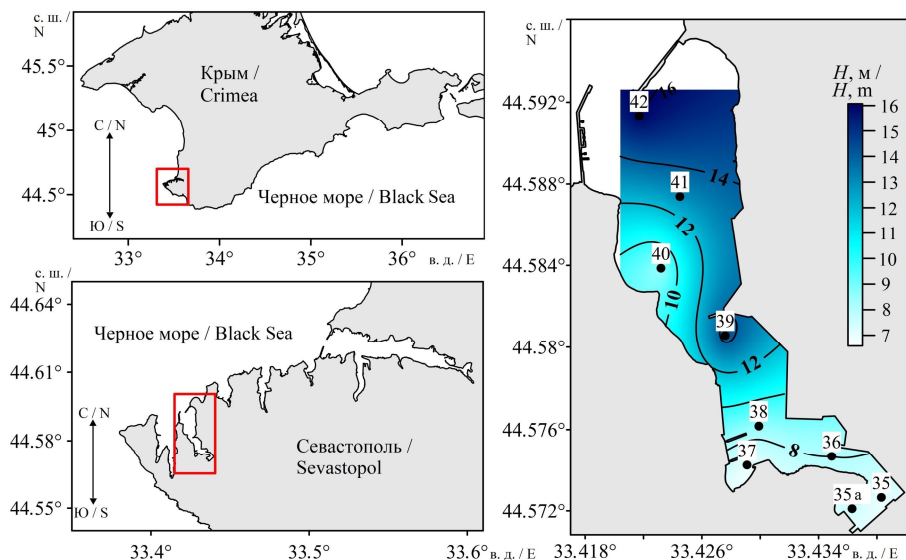
Начиная с 2014 г. грузооборот рыбного порта Камышовой бухты сократился, количество входящих в порт судов уменьшилось. К 2017 г. грузооборот упал с 2.5 млн до 300 тыс. т [10]. Тем не менее уровень загрязнения донных отложений сохраняется, хотя на отдельных участках отмечено некоторое его снижение [11]. При этом исследования, посвященные особенностям пространственного и вертикального распределения в донных отложениях Камышовой бухты органического углерода (C_{org}), а также вертикального распределения кислорода, сероводорода и других ключевых компонентов поровых вод, ранее не проводились. Подобные работы были выполнены для бухт Севастопольского региона: Балаклавской [12], Севастопольской [4, 13], Омеги [13] – и прибрежных районов шельфа Крыма [14, 15].

Цель данной работы – оценка окислительно-восстановительных условий в донных отложениях Камышовой и других бухт Севастопольского региона, изучение геохимических характеристик донных отложений и химического состава поровых вод.

Материалы и методы

Пробы донных отложений для исследования физико-химических характеристик отложений и химического состава поровых вод были отобраны в июле 2021 г. Всего было отобрано девять проб поверхностного слоя донных отложений и две колонки (рис. 1).

Отбор и подготовка проб донных осадков выполнялись в соответствии с нормативными документами (ГОСТ 17.1.5.01-80; ISO 5667-19:2004). Пробы верхнего слоя осадков (0–5 см) отбирались с помощью дночерпателя Петерсона. Колонки донных отложений для изучения вертикальной структуры



Р и с . 1 . Схема станций отбора проб донных отложений

F i g . 1 . Map of bottom sediment sampling stations

осадка отобрали с помощью трубок из оргстекла, которые герметично закрывали сверху и снизу. Такой метод отбора проб позволил сохранить тонкую структуру поверхностного слоя донных отложений и придонного слоя воды.

Для получения химического профиля поровых вод применялся полярографический метод анализа с использованием стеклянного Au-Hg-микроэлектрода [4, 16, 17]. Хлорсеребряный электрод, насыщенный хлоридом серебра, использовали в качестве электрода сравнения, а платиновый электрод – в качестве вспомогательного. Профилирование колонок донных отложений проводилось с вертикальным разрешением от 1 до 10 мм. Главное достоинство метода – возможность проводить анализ состава поровых вод донных отложений в условиях, максимально приближенных к естественным, без разрушения пробы и дополнительной пробоподготовки, с высокой чувствительностью (в том числе O_2 – 5 мкМ, H_2S – 3 мкМ). Погрешность метода – 10 %. С помощью данного метода возможно изучение динамических процессов, происходящих в верхнем слое отложений, где протекает множество реакций, включая минерализацию ОВ [4, 16, 17]. Для анализа физико-химических характеристик в лаборатории колонки разделяли на слои толщиной 1–2 см с помощью ручного экструдера и кольца из акрила.

Гранулометрический состав донных отложений определяли по массовому содержанию частиц различной крупности, выраженному в процентах, по отношению к массе сухой пробы грунта, взятой для анализа. При этом применялся комбинированный метод просеивания и седиментации. Алеврито-пелитовая фракция (≤ 0.05 мм) отделялась методом мокрого просеивания с последующим определением сухой массы гравиметрически. Крупнозернистые фракции (> 0.05 мм) разделялись ситовым методом сухого просеивания с использованием стандартных сит (ГОСТ 12536-2014).

Содержание $C_{орг}$ определялось кулонометрически на экспресс-анализаторе АН-7529 по методике, адаптированной для морских донных отложений [18].

Результаты и обсуждение

Гранулометрический состав осадков в бухте разнообразен (рис. 2, табл. 1). Установлено, что средний размер частиц осадка в Камышовой бухте (1.5 мм) выше среднего размера частиц в Севастопольской (0.23 мм), Казачьей (0.45 мм) [19] и Балаклавской (0.46 мм) [20] бухтах.

В верховье бухты (ст. 40–42) отложения представлены ракушечным гравием и детритом, а также песком (рис. 2, *a, b*). В этой части бухты отмечено максимальное сосредоточение крупнодисперсного гравийно-галечного материала (34–76 %) и минимальное – мелкодисперсных пелито-алевритовых илов (1–2 %). По направлению к кутовой части доля крупнозернистого ракушечного материала уменьшается, а доля мелкозернистых пелитовых илов возрастает. В центральной части бухты (ст. 37–39) отложения состоят преимущественно из алевритовых и пелитовых илов (рис. 2, *c, d*), а доля илистой фракции на этом участке в среднем составляет 94 %. Для отложений в южной части бухты характерно наличие ракушечного детрита (до 33 %), а также максимальное содержание пелитового материала (81 %) в кутовой станции (ст. 35а).

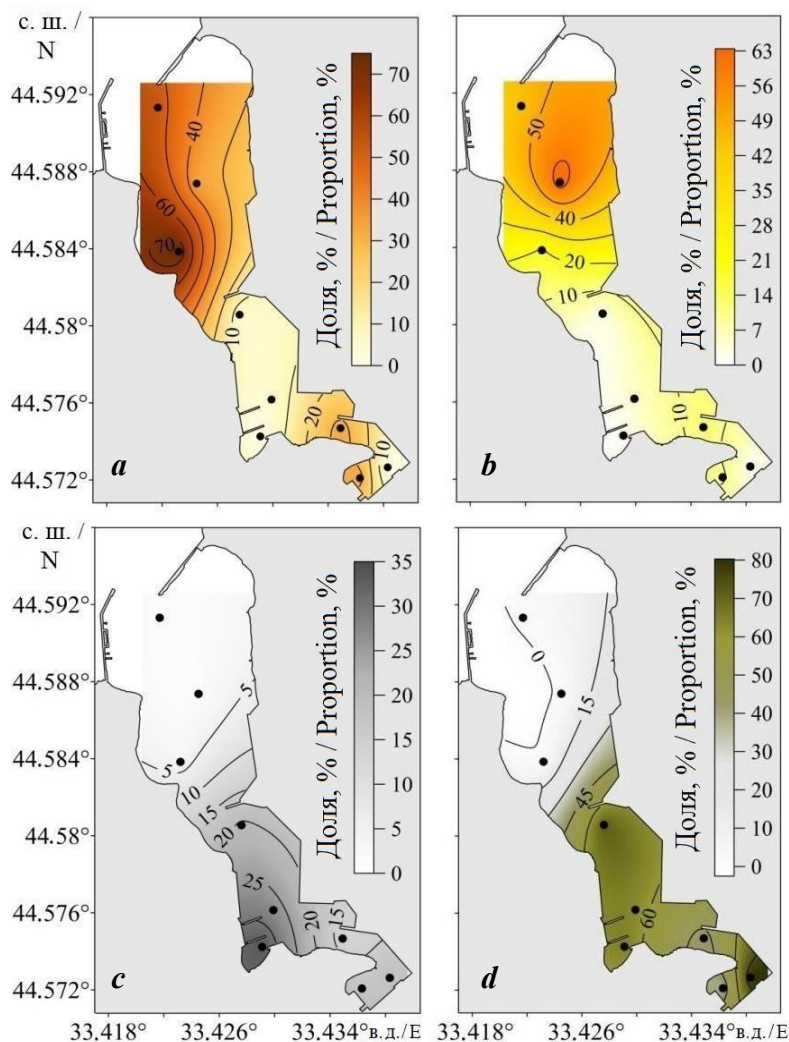


Рис. 2. Распределение гравийной (a), песчаной (b), алеврито-пелитовой (c), пелито-алевритовой (d) фракций в донных отложениях

Fig. 2. Distribution of gravel (a), sand (b), aleurite-pelite (c), pelite-aleurite (d) fractions in bottom sediments

Повышенная доля мелкодисперсного материала в центральной и особенно в южной мелководной частях бухты определяется в первую очередь особенностями морфометрии бухты, большим количеством причалов и пирсов, выполняющих роль волновой тени и обеспечивающих накопление материала, а также особенностями гидродинамики и слабым водообменом. Таким образом, весь материал, поступающий сюда с ливневыми и коммунально-бытовыми стоками, здесь же и накапливается.

Это отразилось на распределении органического углерода в поверхностном слое донных отложений Камышовой бухты (рис. 3, a; табл. 1), которое изменялось от 0.3–0.4 % сух. масс. на станциях в районе выхода из бухты

Таблица 1. Фракционный состав донных отложений и содержание органического углерода

Table 1. Particle size distribution of bottom sediments and organic carbon content

№ станции / Station no.	Фракции, % / Fractions, %				C _{орг} , % / C _{org} , %
	гравийная (10–1 мм) / gravel (10–1 mm)	песчаная (< 1–0.1 мм) / sand (< 1–0.1 mm)	алеврито-пелитовая (< 0.1–0.05 мм) / aleurite-pelite (< 0.1–0.05 mm)	пелито-алевритовая (< 0.05–0.001 мм) / pelite-aleurite (< 0.05–0.001 mm)	
42	53.4	44.2	1.3	1.1	0.3
41	33.8	63.6	1.2	1.4	0.3
40	75.8	19.3	3.1	1.8	0.4
39	5.1	2.3	20.7	71.9	1.9
38	5.0	5.1	27.0	63.0	1.3
37	0	1.1	33.7	65.2	2.2
36	33.0	12.1	12.9	42.0	1.2
35	32.8	11.0	17.0	39.2	1.8
35a	0	1.3	18.1	80.6	1.4

до 2–2.2 % сух. масс. на станциях в центральной части бухты с постепенным снижением в кутовой части. Средняя величина содержания C_{орг} в донных отложениях Камышовой бухты (1.2 % сух. масс.) оказалась ниже по сравнению с другими бухтами Севастопольского региона: бухтой Омега (1.4 % сух. масс.), Балаклавской бухтой (1.97 % сух. масс.) [20], Казачьей (2.7 % сух. масс.) [21], Севастопольской (3.7 % сух. масс.) и Стрелецкой (4.3 % сух. масс.) [21]. Это может свидетельствовать об отсутствии постоянного источника ОВ в бухте. Максимальные значения содержания органического углерода отмечены в местах скопления мелкодисперсного материала (рис. 2; 3, а). Для проб поверхностного слоя отложений отмечена высокая положительная корреляция (0.91) между концентрациями C_{орг} и содержанием пелито-алевритового материала.

Помимо пространственной изменчивости содержания органического углерода в поверхностном слое донных отложений, для ст. 35а и 39 был изучен и его вертикальный профиль (рис. 3, b; табл. 2). Установлено, что для центральной части бухты (ст. 39) значение C_{орг} в слое 0–10 см практически не изменялось (в пределах 0.1 %), а в слое 12–14 см возрастало, достигая максимума – 2.2 % сух. масс. Такой характер вертикального C_{орг} может указывать на то, что уровень техногенной нагрузки на донные отложения Камышовой бухты в последние годы не изменяется.

Для кутовой южной части бухты (ст. 35а) концентрация C_{орг} в слое 0–10 см убывала от 1.6 до 0.7 % сух. масс., а затем увеличивалась до 1.5 % сух. масс. в слое 16–18 см. Повышенные концентрации C_{орг} в верхних слоях кутовой части бухты указывают на имеющиеся в этом районе источники ОВ, вероятно антропогенного происхождения.

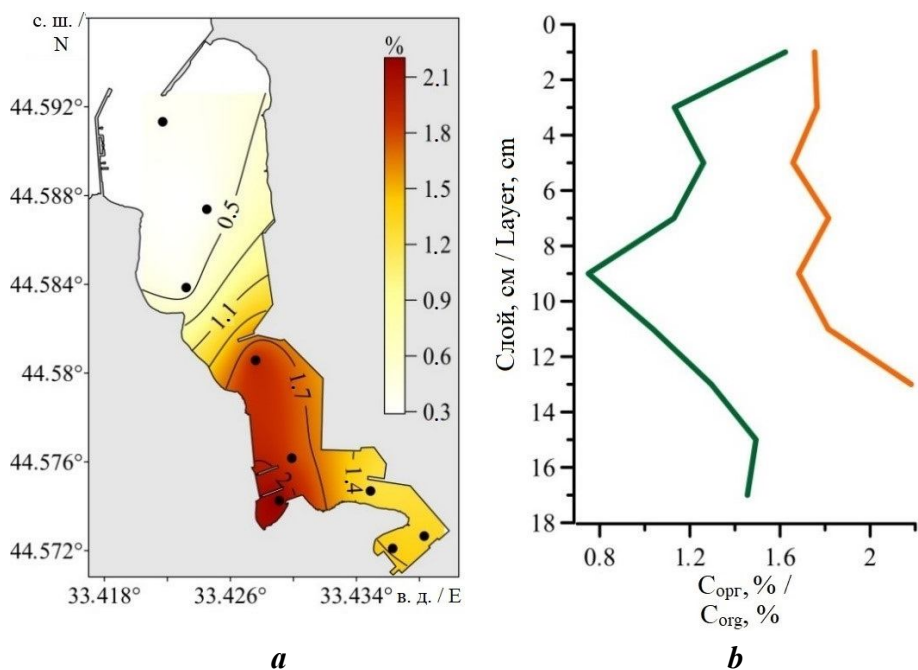


Рис. 3. Особенности пространственного (а) и вертикального (b) распределения C_{org} в донных отложениях бухты (зеленая линия – ст. 35а, оранжевая – ст. 39)

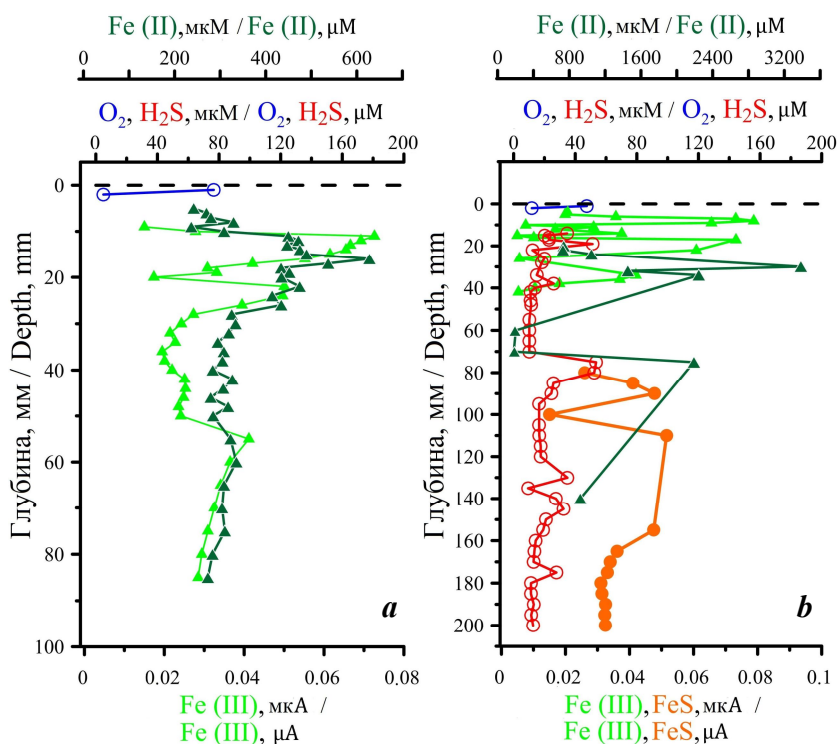
Fig. 3. Peculiarities of spatial (a) and vertical (b) distribution of C_{org} in bottom sediments of the bay (green line – St. 35a, orange line – St. 39)

Таблица 2. Вертикальное распределение органического углерода в донных отложениях

Table 2. Vertical distribution of organic carbon in bottom sediments

№ станции / Station no	C_{org} , %, в слое осадка, см / C_{org} , %, in sediment layer, cm								
	0–2	2–4	4–6	6–8	8–10	10–12	12–14	14–16	16–18
35	1.62	1.13	1.26	1.13	0.75	1.04	1.30	1.49	1.46
39	1.75	1.76	1.66	1.82	1.68	1.81	2.18	–	–

Анализ поровых вод донных отложений показал развитие дефицита кислорода в верхнем слое отложений на ст. 39 (67 % нас., 163 мкМ). Аналогичная ситуация наблюдается в Севастопольской (122 мкМ) [13] и Казачьей (126 мкМ) бухтах. Для сравнения: концентрация кислорода в верхнем слое отложений прибрежных районов шельфа Крымского п-ова в среднем изменялась от 200 до 300 мкМ [4, 15]. Кислород на ст. 39 проникал в осадок на глубину до 2 мм (рис. 4, а). В целом незначительную глубину проникновения кислорода в осадок можно объяснить мелкодисперсным характером осадков в бухте Камышовой.



Р и с. 4. Вертикальные профили поровых вод Камышовой бухты на станциях 39 (а) и 35а (b) в июле 2021 г.

Fig. 4. Vertical profiles of pore waters of Kamyshovaya Bay at Stations 39 (a) and 35a (b) in July 2021

Основным компонентом поровых вод было железо (рис. 4, а). Концентрация Fe (II) увеличивалась с глубиной, достигая максимума (628 мкМ) в слое 16 мм, а затем убывала. Максимальное содержание Fe (III) отмечено в слое 11 мм, особенности вертикального распределения были схожи с Fe (II). Сероводород на этой станции зафиксирован не был. Таким образом, в поверхностном слое донных отложений отмечены субкислородные условия. Основные биогеохимические процессы протекали с участием железа (Fe (II, III)).

В поверхностном слое донных отложений кутовой части (ст. 35а) содержание кислорода снижалось до 48 мкМ (20 % нас.). Химия поровых вод определялась процессами с участием растворенных форм железа (Fe (II, III)) и сероводорода (рис. 4, b). Преобладающим компонентом поровых вод был сероводород. В целом его распределение было равномерным, с наличием максимумов в слоях 19 и 75 мм (со значениями 51 и 53 мкМ соответственно). Пик сероводорода в верхней части колонки может указывать на «свежий» источник ОВ. Однако содержание сероводорода в поровых водах данного района было ниже по сравнению с его содержанием в других бухтах Севастопольского региона: в Балаклавской бухте максимальные концентрации сероводорода достигали 73 мкМ [12], в бухте Омега – 213 мкМ, в Казачьей бухте – 941 мкМ, в Южной бухте – 1538 мкМ [13]. Для сравнения: на западном побережье Крымского п-ова концентрация сероводорода в донных

отложениях достигала 276–435 мкМ [15]. При этом поровые воды донных отложений кутовой части Камышовой бухты отличались высоким содержанием Fe (II) с максимальной концентрацией 3384 мкМ в верхнем слое отложений (0–30 мм). Полученные значения значительно выше, чем в Балаклавской (861 мкМ) и Казачьей (2005 мкМ) бухтах, и близки к значению, полученному на станции в районе Ялты (4500 мкМ) [15], но ниже, чем в Южной бухте (8292 мкМ). По вертикальному профилю компонентов поровых вод можно заключить, что в верхней части осадка (0–10 мм) все еще наблюдаются субкислородные условия, однако ниже преобладающими становятся анаэробные.

Выводы

Были получены и проанализированы новые натурные данные химического состава поровых вод (вертикальное распределение кислорода, сероводорода, окисленных и восстановленных форм железа) и геохимических характеристик донных отложений (гранулометрический состав, содержание органического углерода) для Камышовой бухты.

Установлено, что химия поровых вод определялась процессами с участием растворенных форм железа (Fe (II, III)) и сероводорода. Отмечено, что в верхнем слое отложений наблюдаются субкислородные условия, что указывает на формирование зон экологического риска экосистемы бухты.

В верховье бухты осадки представлены ракушечным гравием и песком, а в центральной и южной частях – алевритовыми и пелитовыми илами. Содержание органического углерода в поверхностном слое донных отложений Камышовой бухты менялось в пределах от 0.3 до 2.2 % сух. масс., что ниже, чем в других бухтах Севастопольского региона.

Анализ полученных результатов позволяет предположить отсутствие значимых постоянных источников ОВ. Однако, несмотря на отмеченное ранее общее снижение техногенной нагрузки на экосистему бухты за последние годы, содержание ОВ увеличивается. По-видимому, увеличение содержания ОВ на фоне уменьшающейся антропогенной нагрузки объясняется влиянием естественных факторов: поступлением терригенного материала с ливневыми стоками, особенностями морфологии кутовой части бухты, ее слабым водообменом с другими частями акватории и с открытым морем.

Сохранение таких тенденций может привести к тому, что наблюдаемые в настоящее время субкислородные условия в донных отложениях могут смениться анаэробными. Повысится риск заморных явлений, в результате это приведет к появлению безжизненных участков в акватории.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Natural and human-induced hypoxia and consequences for coastal areas: synthesis and future development / J. Zhang [et al.] // *Biogeosciences*. 2010. Vol. 7, iss. 5. P. 1443–1467. <https://doi.org/10.5194/bg-7-1443-2010>
2. *Moodley L., Heip C. H. R., Middelburg J. J.* Benthic activity in sediments of the northwestern Adriatic Sea: sediment oxygen consumption, macro- and meiofauna dynamics // *Journal of Sea Research*. 1998. Vol. 40, iss. 3–4. P. 263–280. [https://doi.org/10.1016/S1385-1101\(98\)00026-4](https://doi.org/10.1016/S1385-1101(98)00026-4)

3. *Diaz R. J.* Overview of hypoxia around the world // *Journal of Environmental Quality*. 2001. Vol. 30, iss. 2. P. 275–281. <https://doi.org/10.2134/jeq2001.302275x>
4. *Орехова Н. А., Коновалов С. К.* Полярография донных осадков Севастопольской бухты // *Морской гидрофизический журнал*. 2009. № 2. С. 52–66.
5. Reactive transport in surface sediments. I. Model complexity and software quality / F. J. R. Meysman [et al.] // *Computers & Geosciences*. 2003. Vol. 29, iss. 3. P. 291–300. [https://doi.org/10.1016/S0098-3004\(03\)00006-2](https://doi.org/10.1016/S0098-3004(03)00006-2)
6. Distribution of oxygen in surface sediments from central Sagami Bay, Japan: In situ measurements by microelectrodes and planar optodes / R. N. Glud [et al.] // *Deep Sea Research Part I: Oceanographic Research Papers*. 2005. Vol. 52, iss. 10. P. 1974–1987. <https://doi.org/10.1016/j.dsr.2005.05.004>
7. *Holmer M.* The effect of oxygen depletion on anaerobic organic matter degradation in marine sediments // *Estuarine, Coastal and Shelf Science*. 1999. Vol. 48, iss. 3. P. 383–390. <https://doi.org/10.1006/ecss.1998.0424>
8. Гидрохимическая характеристика отдельных бухт Севастопольского взморья / Е. А. Куфтаркова [и др.] // *Труды ЮГНИРО*. Керчь: ЮГНИРО, 2008. Т. 46. С. 110–117.
9. Санитарно-биологические исследования прибрежных акваторий юго-западного Крыма в начале XXI века / Отв. ред. О. Г. Миронова, С. В. Алёмова. Симферополь : ИП «АРИАЛ», 2018. 270 с. URL: https://repository.marine-research.org/bitstream/299011/5423/1/Санитарно-биол_иссл_2018.pdf (дата обращения: 22.01.2022).
10. *Миронов О. Г., Кирюхина Л. Н., Алёмов С. В.* Санитарно-биологические аспекты экологии севавтопольских бухт в XX веке. Севастополь : ЭКОСИ-Гидрофизика, 2003. 185 с. URL: https://repository.marine-research.org/bitstream/299011/1466/1/Sanitarno-biologicheskije_Aspekty.pdf (дата обращения: 22.01.2022).
11. *Соловьёва 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 (70), № 4. С. 196–206. URL: http://sn-biolchem.cfuv.ru/wp-content/uploads/2018/12/ilovepdf_com-196-206.pdf (дата обращения: 22.01.2022).
12. *Орехова Н. А., Овсяный Е. И., Тихонова Е. А.* Органическое вещество и окислительно-восстановительные условия в донных отложениях Балаклавской бухты // *Ученые записки Крымского федерального университета имени В. И. Вернадского. Биология. Химия*. 2019. Т. 5, № 3. С. 49–64. URL: https://www.researchgate.net/publication/338005651_ORGANICESKOE_VESESTVO_I_OKISLITELNO-VOSSTANOVITELNYE_USLOVIA_V_DONNYH_OTLOZENIAH_BALAKLA_VSKOJ_BUHTY (дата обращения: 22.01.2022).
13. *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. doi:10.1134/S0030157418050106
14. *Orekhova N. A., Kononov S. K.* Biogeochemistry of oxygen deficiency in nearshore Black Sea regions of Crimea // *Proceedings of the Fourteenth International MEDCOAST Congress on Coastal and Marine Sciences, Engineering, Management and Conservation, MEDCOAST 2019, 22–26 October 2019, Marmaris, Turkey*. Mugla, Turkey : MEDCOAST Foundation, 2019. Vol. 1. P. 297–306. URL: https://www.researchgate.net/publication/337679521_Biogeochemistry_of_Oxygen_Deficiency_in_Nearshore_Black_Sea_Regions_of_Crimea (date of access: 22.01.2022).

15. *Kurinnaya Y., Orekhova N.* Coastal hypoxia in areas under anthropogenic pressure // Proceedings of the 20th International Multidisciplinary Scientific GeoConference, SGEM 2020 (Albena, Bulgaria, 16–25 August, 2020). Sofia, Bulgaria, 2020. Vol. 20, iss. 3.1. P. 823–830. doi:10.5593/sgem2020/3.1/s15.106
16. *Brendel P. J., Luther III G. W.* Development of a gold amalgam voltammetric micro-electrode for the determination of dissolved Fe, Mn, O₂, and S(-II) in pore waters of marine and fresh water sediments // Environmental Science & Technology. 1995. Vol. 29, iss. 3. P. 751–761. doi:10.1021/es00003a024
17. Simultaneous measurement of O₂, Mn, Fe, I-, and S (-II) in marine pore waters with a Solid-State voltammetric microelectrode / G. W. Luther III [et al.] // Limnology and Oceanography. 1998. Vol. 43, iss. 2. P. 325–333. <https://doi.org/10.4319/lo.1998.43.2.0325>
18. *Люцарев С. В.* Определение органического углерода в морских донных отложениях методом сухого сжигания // Океанология. 1986. Т. 26, вып. 4. С. 704–708.
19. Некоторые геохимические показатели донных отложений прибрежной акватории под влиянием антропогенного фактора (на примере бухты Казачья, г. Севастополь) / Е. А. Котельянец [и др.] // Вестник Удмуртского университета. Серия Биология. Науки о Земле. 2017. Т. 27, вып. 1. С. 5–13.
20. Загрязняющие вещества в донных отложениях Балаклавской бухты (Черное море) / Е. А. Котельянец [и др.] // Морской гидрофизический журнал. 2019. Т. 35, № 5. С. 469–480. doi:10.22449/0233-7584-2019-5-469-480
21. Органическое вещество и гранулометрический состав современных донных отложений Балаклавской бухты (Черное море) / Н. А. Орехова [и др.] // Морской гидрофизический журнал. 2018. Т. 34, № 6. С. 523–533. doi:10.22449/0233-7584-2018-6-523-533

Поступила 29.10.2021 г.; одобрена после рецензирования 20.12.2021 г.; принята к публикации 4.02.2022 г.; опубликована 25.03.2022 г.

Об авторах:

Куринная Юлия Сергеевна, инженер, аспирант, Морской гидрофизический институт РАН (299011, Россия, Севастополь, ул. Капитанская, д. 2), **ORCID ID: 0000-0002-9826-4789**, kurinnaya-jul@yandex.ru

Гуров Константин Игоревич, младший научный сотрудник, Морской гидрофизический институт РАН (299011, Россия, Севастополь, ул. Капитанская, д. 2), **ORCID ID: 0000-0003-3460-9650**, **ResearcherID: L-7895-2017**, gurovki@gmail.com

Забегав Иван Андреевич, младший научный сотрудник, Морской гидрофизический институт РАН (299011, Россия, Севастополь, ул. Капитанская, д. 2), zabegaev84@gmail.com

Орехова Наталья Александровна, заведующая отделом биогеохимии моря, Морской гидрофизический институт РАН (299011, Россия, Севастополь, ул. Капитанская, д. 2), кандидат географических наук, **ORCID ID: 0000-0002-1387-970X**, **ResearcherID: I-1755-2017**, natalia.orekhova@mhi-ras.ru

About the authors:

Yuliya S. Kurinnaya, Engineer, Postgraduate Student, Marine Hydrophysical Institute of RAS (2 Kapitanskaya St., Sevastopol, 299011, Russian Federation), **ORCID ID: 0000-0002-9826-4789**, *kurinnaya-jul@yandex.ru*

Konstantin I. Gurov, Junior Research Associate, Marine Hydrophysical Institute of RAS (2 Kapitanskaya St., Sevastopol, 299011, Russian Federation), **ORCID ID: 0000-0003-3460-9650**, **ResearcherID: L-7895-2017**, *gurovki@gmail.com*

Ivan A. Zabegaev, Junior Research Associate, Marine Hydrophysical Institute of RAS (2 Kapitanskaya St., Sevastopol, 299011, Russian Federation), *zabegaev84@gmail.com*

Natalia A. Orekhova, Head of Marine Biogeochemistry Department, Marine Hydrophysical Institute of RAS (2 Kapitanskaya St., Sevastopol, 299011, Russian Federation), Ph.D. (Geogr.), **ORCID ID: 0000-0002-1387-970X**, **ResearcherID: I-1755-2017**, *natalia.orekhova@mhi-ras.ru*

Заявленный вклад авторов:

Куринная Юлия Сергеевна – формулировка и постановка задачи, качественный и количественный анализ результатов, их интерпретация

Гуров Константин Игоревич – отбор проб, качественный и количественный анализ результатов, подготовка графических материалов

Забегав Иван Андреевич – определение содержания органического углерода

Орехова Наталья Александровна – формулировка и постановка задачи, критический анализ и доработка текста

Contribution of the authors:

Yuliya S. Kurinnaya – problem statement, qualitative and quantitative analysis of the results and their interpretation

Konstantin I. Gurov – sampling, qualitative and quantitative analysis of the results, preparation of visual materials

Ivan A. Zabegaev – determination of organic carbon content

Natalia A. Orekhova – problem statement, critical analysis and elaboration of the text

Все авторы прочитали и одобрили окончательный вариант рукописи.

All the authors have read and approved the final manuscript.