


Формирование зон экологического риска в прибрежных акваториях Керченского пролива

К. И. Гуров , Ю. С. Гурова, Н. А. Орехова, С. К. Коновалов

Морской гидрофизический институт РАН, Севастополь, Россия

 *gurovki@gmail.com*

Поступила в редакцию 28.03.2022; одобрена после рецензирования 12.04.2022;
принята к публикации 09.09.2022.

Аннотация

Цель. Изучить особенности гидролого-гидрохимической структуры придонного слоя вод и распределения геохимических параметров в толще донных осадков; оценить основные факторы формирования окислительно-восстановительных условий в донных отложениях Керченского пролива – цель настоящей работы.

Методы и результаты. Комплексные исследования экосистемы Керченского пролива были выполнены в июле и сентябре 2020 г. Гидрохимические исследования водной толщи выполнялись с помощью стандартных гидрохимических методик. Были получены профили вертикального распределения кислорода, сероводорода, окисленных и восстановленных форм железа в поровых водах, а также определены геохимические характеристики донных отложений. Рассмотрены особенности их пространственного и вертикального распределения. Отбор проб колонок отложений проводился с помощью ручного пробоотборника и акриловой грунтовой трубки с внутренним диаметром 60 мм и вакуумным затвором. Для получения химического профиля поровых вод применялся полярографический метод анализа с использованием стеклянного Au-Hg-микроэлектрода. Отмечено, что в июле в поверхностном горизонте гидрохимическая структура вод определялась вкладом черноморских вод, в придонном – азовских. Установлено, что в летний период в поверхностном слое Таманского залива наблюдалось повышенное содержание биогенных веществ, а повышенная температура вод и соленость, а также активное потребление кислорода в придонном слое привели к уменьшению степени его насыщения в центральной части залива. В результате это способствовало заилению Таманского залива, интенсивному потреблению кислорода на окисление органического вещества и развитию анаэробных условий, появлению сероводорода уже в поверхностном слое донных отложений. В сентябре основной вклад вносили черноморские воды, что способствовало насыщению придонного слоя вод кислородом и снижению концентрации биогенных веществ в 2–3 раза. При этом в сентябре кислород проникал в осадок до 2 мм, а содержание сероводорода было в 3 раза ниже, чем в июле.

Выводы. Установлено, что затрудненный водообмен в районе Таманского залива и накопление органического вещества в донных отложениях за счет поступления значительного количества взвеси привели к ограничению потока кислорода в придонный слой вод, а мелкодисперсный характер осадков затрудняет поступление кислорода в донные отложения. В результате это приводит к заилению Таманского залива, интенсивному потреблению кислорода на окисление органического вещества и развитию анаэробных условий, появлению сероводорода уже в поверхностном слое донных отложений. Отмеченные в настоящее время бескислородные условия в верхнем слое отложений могут привести к развитию дефицита кислорода в придонном слое вод и формированию зон экологического риска в экосистеме Керченского пролива.

Ключевые слова: гидрологические параметры, гидрохимические параметры, течения, донные отложения, поровые воды, кислород, полярография, гранулометрический состав, органический углерод, Керченский пролив

Благодарности: работа выполнена в рамках государственного задания по темам FNNN-2021-0005 «Комплексные междисциплинарные исследования океанологических процессов, определяющих функционирование и эволюцию экосистем прибрежных зон Черного и Азовского морей» и FNNN-2022-0003 «Оценка зависимости потоков CO₂ на поверхности Черного моря от физико-химических характеристик морской среды и получение характеристик сезонных изменений потоков», а также при поддержке проекта РФФИ № 20-35-90103.

Для цитирования: Формирование зон экологического риска в прибрежных акваториях Керченского пролива / К. И. Гуров [и др.] // Морской гидрофизический журнал. 2022. Т. 38, № 6. С. 637–654. EDN MEJENQ. doi:10.22449/0233-7584-2022-6-637-654

Formation of the Ecological Risk Zones in the Coastal Water Areas of the Kerch Strait

К. И. Гуров ✉, **Yu. S. Gurova**, **N. A. Orekhova**, **S. K. Konovalov**

Marine Hydrophysical Institute, Russian Academy of Sciences, Sevastopol, Russia
✉ gurovki@gmail.com

Abstract

Purpose. The paper is aimed at studying the features of hydrological and hydrochemical structure of the bottom water layer and the distribution of geochemical parameters in the bottom sediments, and also at evaluating the basic factors in formation of the redox conditions in the bottom sediments of the Kerch Strait.

Methods and Results. The Kerch Strait ecosystem was comprehensively investigated in July and September, 2020. Hydrochemical studies of the water column were carried out using the standard hydrochemical methods. The profiles of the vertical distribution of oxygen, hydrogen sulfide, oxidized and reduced forms of iron in the pore waters were obtained, and also the geochemical characteristics of bottom sediments were defined. The features of their spatial and vertical distribution were considered. The sediment columns were sampled by a hand sampler and an acrylic soil tube (its internal diameter is 60 mm) with a vacuum seal. The pore water chemical profile was obtained by the polarographic method of analysis that included a glass Au-Hg-microelectrode. Hydrochemical structure of the surface horizon waters in July was noted to be conditioned by the Black Sea water contribution, and that of the bottom horizon waters – by the Azov Sea waters. It has been established that in a summer period in the Taman Gulf surface layer, an increased content of biogenic substances took place; and the increased water temperature and salinity, as well as active oxygen consumption in the bottom water layer decreased the degree of its saturation in the central part of the gulf. As a result, this favored the Taman Gulf silting, intensive oxygen consumption for oxidizing organic matter and the development of anaerobic conditions, and the hydrogen sulfide arising already in the surface layer of bottom sediments. In September, the main contribution was made by the Black Sea waters, that promoted the bottom water saturation with oxygen and the nutrient concentration decrease by 2–3 times. At that in September, oxygen penetrated into the sediment up to 2 mm, and the hydrogen sulfide content was 3 times lower than that in July.

Conclusions. It has been revealed that the hampered water exchange in the Taman Gulf region and the accumulation of organic matter in the bottom sediments due to the inflow of a significant amount of suspended matter, resulted in a limitation of the oxygen flow to the water bottom layer, whereas the fine-dispersion character of the sediments hampered penetration of oxygen into the bottom sediments. As a result, this contributed to the Taman Gulf silting, intensive oxygen consumption for oxidizing the organic matter and the development of anaerobic conditions, and to arising of hydrogen sulfide already in the surface layer of bottom sediments. The recorded at present anoxic conditions in the sediments upper layer can result in development of the oxygen deficiency in the bottom water layer and in formation of the ecological risk zones in the ecosystem of the Kerch Strait.

Keywords: hydrological parameters, hydrochemical parameters, currents, bottom sediments, pore waters, oxygen, voltammetry, granulometric composition, organic carbon, Kerch Strait

Acknowledgements: the investigation was carried out within the framework of the state assignment on themes FNNN-2021-0005 “Complex interdisciplinary studies of oceanologic processes which determine functioning and evolution of ecosystems in the coastal zones of the Black Sea and the Sea of Azov” and FNNN-2022-0003 «Assessment of the dependence of CO₂ fluxes on the surface of the Black Sea on the physico-chemical characteristics of the marine environment and obtaining characteristics of seasonal changes in fluxes», and with the support of the RFBR project No. 20-35-90103.

For citation: Gurov, K.I., Gurova, Yu.S., Orekhova, N.A. and Kononov, S.K., 2022. Formation of the Ecological Risk Zones in the Coastal Water Areas of the Kerch Strait. *Physical Oceanography*, 29(6), pp. 619-635. doi:10.22449/1573-160X-2022-6-619-635

Введение

Акватория Керченского пролива является экологически неблагоприятным районом. Здесь осуществляются дампинг грунтов, дноуглубление, отмечается постоянное увеличение антропогенного пресса на морскую среду, что не могло не отразиться на различных составляющих экосистемы пролива – водообмене, вертикальной стратификации вод, гипоксии, миграции промысловых рыб, их массовой гибели и т. д. [1–4]¹. При этом Керченский пролив является важной как промысловой, так и туристической зоной, и ухудшение качества вод отражается на его социально-экономической привлекательности.

К основным показателям оценки экологического состояния морских экосистем относится содержание кислорода как ключевого компонента, определяющего окислительно-восстановительную обстановку и саму возможность существования аэробных биологических организмов. Основными факторами, влияющими на концентрацию кислорода, являются температура, контролирующая растворимость кислорода в воде, а также содержание и реакционная способность органического вещества, определяющие интенсивность расхода кислорода [5]. В случаях, когда скорость потребления кислорода превышает скорость его поступления, в водной толще и донных отложениях развивается дефицит кислорода [6]. Это приводит к смещению последовательности биогеохимических процессов с участием органического вещества со сменой аэробных условий на анаэробные [5]: при исчерпании всего кислорода и отсутствии других кислородсодержащих компонентов (нитраты/нитриты, оксиды марганца и железа) основным окислителем органического вещества в морских системах выступают сульфаты, а продуктом их восстановления являются восстановленные формы серы. В результате формируются бескислородные зоны [5, 7]. В этих условиях происходит угнетение дыхательной деятельности бентосных организмов и снижение их видового разнообразия [8] с преобладанием видов, выживающих в условиях дефицита кислорода [9].

Таким образом, постоянное увеличение антропогенной нагрузки на прибрежные акватории проявляется в увеличении концентрации биогенных и органических веществ. Это приводит к накоплению органического вещества

¹ Иванов В. А., Шатино Н. Б. Моделирование течений в Керченском проливе // Экологическая безопасность прибрежной и шельфовой зон и комплексное исследование ресурсов шельфа. 2004. Вып. 10. С. 207–232; Ломакин П. Д., Панов Д. Б., Спиридонова Е. О. Изменение важнейших составляющих экосистемы Керченского пролива после сооружения тузлинской дамбы. Севастополь, 2008. 74 с. (Препринт / МГИ).

в донных отложениях и его вовлечению в биогеохимические процессы. Так, деструкция органического вещества сопровождается потреблением кислорода в поверхностном слое донных отложений и придонном слое вод, крайним случаем которого является развитие гипоксии и аноксии, появление восстановленных форм серы и железа. Это вызывает ухудшение условий существования, угнетение дыхания, гибель придонных организмов и формирование зон экологического риска.

Характеристики водной толщи в Керченском проливе определяются интенсивной антропогенной нагрузкой, динамикой вод и подвергаются значительной пространственно-временной изменчивости [10, 11]. Донные отложения в отличие от водной толщи более консервативны по своим характеристикам. Это дает возможность исследовать трансформацию природных циклов и перераспределение различных компонентов, переход их из одной формы в другую, более доступную. В частности, определение уровня загрязнения донных осадков считается одним из наиболее удобных и объективных способов оценки состояния морской среды прибрежных районов [12], а изучение окислительно-восстановительных условий позволяет дать прогноз вероятности развития зон дефицита кислорода и зон экологического риска.

В наибольшей степени на концентрацию кислорода и окислительно-восстановительные условия в донных отложениях влияют наличие и реакционная способность органического вещества, а также гранулометрический состав отложений.

В Керченском проливе основными источниками органического вещества являются воды Азовского моря при ветрах северного направления, абразионные берега Керченского и Таманского п-овов и антропогенная деятельность [13–15]².

В последнее время уделяется мало внимания фундаментальным исследованиям донных осадков Керченского пролива. Сотрудники Морского гидрофизического института в 2008–2014 гг. уже выполняли исследования структуры течений в Керченском проливе³. Основные векторы изучения системы вода – взвешенное вещество – донные отложения относятся к таким проблемам, как строительство в акватории дамбы⁴, накопление и распространение различных загрязняющих веществ (тяжелые металлы [12, 16], алифатические

² Пасынков А. А. К вопросу о литодинамических процессах в Керченском проливе и районе острова Коса Тузла // Геология и полезные ископаемые Мирового океана. 2005. № 2. С. 120–126.

³ Гидрофизическая характеристика Керченского пролива в декабре 2009 г. / Г. Ф. Джиганшин [и др.] // Экологическая безопасность прибрежной и шельфовой зон и комплексное использование ресурсов шельфа. 2010. Вып. 23. С. 153–158 ; Керченский пролив в осенний период 2011 года: результаты совместных комплексных исследований, выполненных в экспедициях МГИ НАН Украины и ЮНЦ РАН / В. А. Иванов [и др.] // Морской гидрофизический журнал. 2014. № 1. С. 44–57 ; Течения в Керченском проливе, ADCP-наблюдения, сентябрь 2011 года / В. А. Иванов [и др.] // Экологическая безопасность прибрежной и шельфовой зон и комплексное использование ресурсов шельфа. 2012. Вып. 26, т. 1. С. 170–178 ; Течения в Керченском проливе по данным ADCP наблюдений 2008 – 2009 годов / А. Н. Морозов [и др.] // Экологическая безопасность прибрежной и шельфовой зон и комплексное использование ресурсов шельфа. 2010. Вып. 22. С. 253–267.

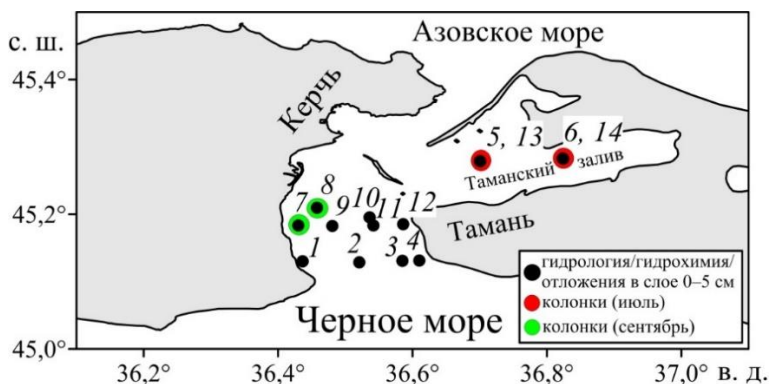
⁴ Ломакин П. Д., Спиридонова Е. О. Динамика донных отложений в Керченском проливе до и после строительства Тузлинской дамбы // Экологическая безопасность прибрежной и шельфовой зон и комплексное использование ресурсов шельфа. 2008. № 17. С. 215–224.

[17] и полициклические ароматические углеводороды [18], хлороформ-экстрагируемые вещества [19]), в том числе после аварий судов в проливе [20, 21]. В то же время влияние гидролого-гидрохимических характеристик придонного слоя вод и геохимических характеристик донных отложений на формирование и динамику окислительно-восстановительных условий в донных отложениях Керченского пролива практически не исследовано.

Цель данной работы – изучить особенности гидролого-гидрохимической структуры придонного слоя вод и распределения геохимических параметров в толще донных осадков; оценить основные факторы формирования окислительно-восстановительных условий в донных отложениях Керченского пролива. В работе использовались материалы тезисов конференции⁵.

Материалы и методы исследования

Комплексные исследования экосистемы Керченского пролива в июле и сентябре 2020 г. включали гидролого-гидрохимические исследования водной толщи и анализ физико-химических характеристик донных отложений. Схема станций отбора проб воды и донных отложений показана на рис. 1. Пробы на ст. 1–6 были отобраны в июле, на ст. 7–14 – в сентябре 2020 г.



Р и с. 1. Схема станций для гидролого-гидрохимических и геохимических исследований в акватории Керченского пролива и Таманского залива в июле и сентябре 2020 г.

F i g. 1. Scheme of the stations for hydrological, hydrochemical and geochemical studies in the Kerch Strait and the Taman Gulf water area in July and September, 2020

Для получения подробных (каждые 0,5 м) вертикальных профилей температуры и солёности использовали CTD-зонд ГАП-12, для исследования динамики вод в акватории Керченского пролива – ADCP WHM1200 (рабочая частота 1200 кГц) производства RDI, США. Прибор позволяет измерять профиль скорости течения в слое до 10–15 м с разрешением по глубине 1 м. Измерения

⁵ Орехова Н. А., Коновалов С. К. Формирование зон экологического риска в районе Керченского пролива // Закономерности формирования и воздействия морских, атмосферных опасных явлений и катастроф на прибрежную зону РФ в условиях глобальных климатических и промышленных вызовов («Опасные явления – III»): материалы III Международной научной конференции памяти члена-корреспондента РАН Д. Г. Матишова (г. Ростов-на-Дону, 15–19 июня 2021 г.). Ростов н/Д.: Изд-во ЮНЦ РАН, 2021. С. 320–324.

выполнялись в режиме выдержки прибора у поверхности моря с борта дрейфующего судна.

Отбор проб морской воды из поверхностного и придонного горизонтов осуществляли с помощью батометра, затем пробы доставляли в лабораторию на берегу.

Содержание растворенного кислорода в пробах воды определяли методом объемного титрования по Винклеру в модификации Карпентера [22]. Методика позволяет получить результаты с точностью до $\pm 0,010$ мл/л ($\pm 0,4$ мкМ). Степень насыщения кислородом (%) рассчитывали по формуле Вейса [23]

$$\ln C = A_1 + A_2 (100/T) + A_3 \ln (T/100) + A_4 (T/100) + S [B_1 + B_2 (T/100) + B_3 (T/100)^2], \quad (1)$$

где C – растворимость кислорода при общем давлении в 1 атм с учетом давления насыщенного водяного пара, мл/л; $A_{(1,2,3,4)}$ и $B_{(1,2,3)}$ – константы ($A_1 = -173,4292$, $A_2 = 249,6339$, $A_3 = 143,3483$, $A_4 = -21,8492$; $B_1 = -0,033096$, $B_2 = 0,014259$, $B_3 = -0,0017$); T – абсолютная температура, К; S – соленость, ‰.

Минеральные формы биогенных веществ (фосфаты, кремнекислота, аммонийный азот) анализировали фотометрическим методом на спектрофотометре КФК-3КМ после фильтрации проб морской воды через мембранный фильтр с размером пор 0,45 мкм (за исключением проб на определение содержания ионов аммония)⁶. При определении концентрации кремнекислоты вносили поправку на соленость, рассчитанную по формуле

$$C_{\text{ист}} = C_{\text{набл}} (1 + 0,0045 S), \quad (2)$$

где $C_{\text{ист}}$ – истинная концентрация кремнекислоты; $C_{\text{набл}}$ – наблюдаемая концентрация кремнекислоты; S , ‰ – конечная соленость анализируемой пробы⁶.

Аммонийный азот определяли с помощью модифицированного метода Сэджи – Солорзано для морской воды, в основе которого лежит фенол-гипохлоритная реакция с использованием нитропруссид натрия и цитрата натрия⁷. Для определения суммы нитратов и нитритов на проточном автоанализаторе *AutoAnalyzer AA II* (фирма *Bran+Luebbe*) использовался метод восстановления нитратов до нитритов с помощью омедненного кадмия.

Пробы поверхностного слоя донных осадков Керченского пролива для исследования пространственного распределения физических (гранулометрический состав, влажность) и химических (содержание общего, органического, карбонатного углерода) характеристик были отобраны с помощью дночерпателя ДЧ 0,025.

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 применяли комбинированный метод декантации и рассеивания. Отделение алеврито-пелитовой фракции ($\leq 0,05$ мм) выполняли мокрым просеиванием с последующим определением сухой массы гравиметрически. Крупнозернистые фракции

⁶ Современные методы гидрохимических исследований океана / Под ред. О. К. Бордовского. М. : ИО АН СССР, 1992. 201 с.

⁷ Unesco technical papers in marine science. Thermodynamic of the carbon dioxide system in seawater. Unesco, 1987. Vol. 51. P. 3–21.

(> 0,05 мм) разделяли ситовым методом сухого просеивания с использованием стандартных сит (ГОСТ 12536-2014).

Содержание углерода ($C_{\text{орг}}$, $C_{\text{карб}}$, $C_{\text{общ}}$) определяли кулонометрически на экспресс-анализаторе АН-7529 по методике, адаптированной для морских донных отложений [24].

Отбор проб колонок отложений (ст. 5, 6, 7, 8, 13, 14) проводили с помощью ручного пробоотборника и акриловой грунтовой трубки с внутренним диаметром 60 мм и вакуумным затвором. Отбор осуществляли таким образом, чтобы сохранить тонкую структуру осадка и придонного слоя вод. На борту колонки закрывали снизу пробкой и транспортировали на берег.

Для получения химического профиля поровых вод (содержание растворенных O_2 , $Mn(II)$, $Fe(II, III)$, FeS , H_2S) применяли полярографический метод анализа с использованием стеклянного Au-Hg-микроэлектрода [25, 26]. Хлор-серебряный электрод использовали в качестве электрода сравнения, платиновый – как вспомогательный. Профилирование колонок донных отложений проводили с вертикальным разрешением в диапазоне 1–10 мм. Погрешность метода 10%.

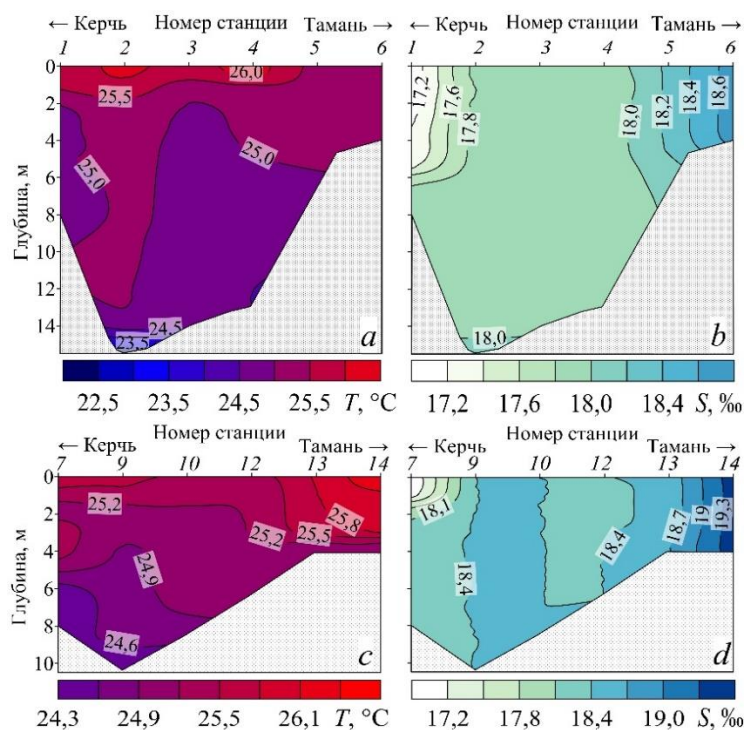
Результаты и обсуждение

Гидрология и гидродинамика вод.

По характеру вертикальных профилей на станциях, выполненных в июле, термохалинную структуру в южной части Керченского пролива и Таманском заливе можно разделить на три типа. Особенности пространственного и вертикального распределения гидрологических параметров показаны на рис. 2. Воды первого типа расположены у западного берега исследуемой области (ст. 1), для них характерна минимальная для всей съемки соленость (17‰) (рис. 2, *b*). По-видимому, характеристики верхнего слоя вод (0 м) на этом участке определялись метеорологическими условиями (ветер северного направления (<https://www.ventusky.com>)) и вкладом азовоморских вод, а пониженная соленость в подповерхностном слое – совместным влиянием площадного пресноводного стока с берегов Керченского п-ова и поступлением вод из Азовского моря (рис. 2, *a, b*) [10]. С глубиной величины солености незначительно растут, это можно объяснить поступлением черноморских вод, на что указывают данные векторов течений на глубине 2 м (рис. 3, *a*).

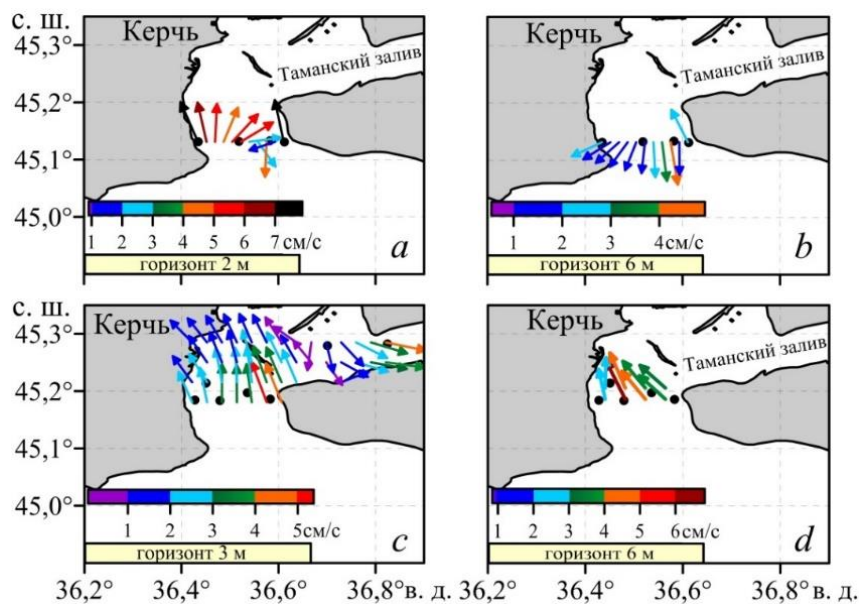
Воды Таманского залива (ст. 4, 6) равномерно прогреты по глубине (25,4°C), для них отмечена максимальная соленость (18,6‰) (рис. 2, *b*). Термохалинная структура вод залива может объясняться как результатом выраженной стратификации вод и интенсивного испарения в летний период, так и вкладом вод Черного моря (рис. 3, *a*).

В центральной части исследуемого разреза (ст. 2–4) и вблизи берегов Таманского п-ова наблюдались водные массы с выраженным вертикальным градиентом температуры (26,2–23,5°C) и однородной по глубине соленостью 17,8–17,9‰ (рис. 2, *b*), что объясняется поступлением вод со стороны Азовского моря. Полученные результаты подтверждаются данными результатов измерений ADCP (рис. 3, *b*).



Р и с. 2. Распределение температуры и солёности в толще вод Керченского пролива и Таманского залива в июле (*a, b*) и сентябре (*c, d*) 2020 г.

Fig. 2. Temperature and salinity distribution in the water columns of the Kerch Strait and the Taman Gulf in July (*a, b*) and September (*c, d*), 2020



Р и с. 3. Профили течений по данным ADCP в июле (*a, b*) и сентябре (*c, d*) 2020 г.

Fig. 3. Current profiles based on the ADCP data in July (*a, b*) and September (*c, d*), 2020

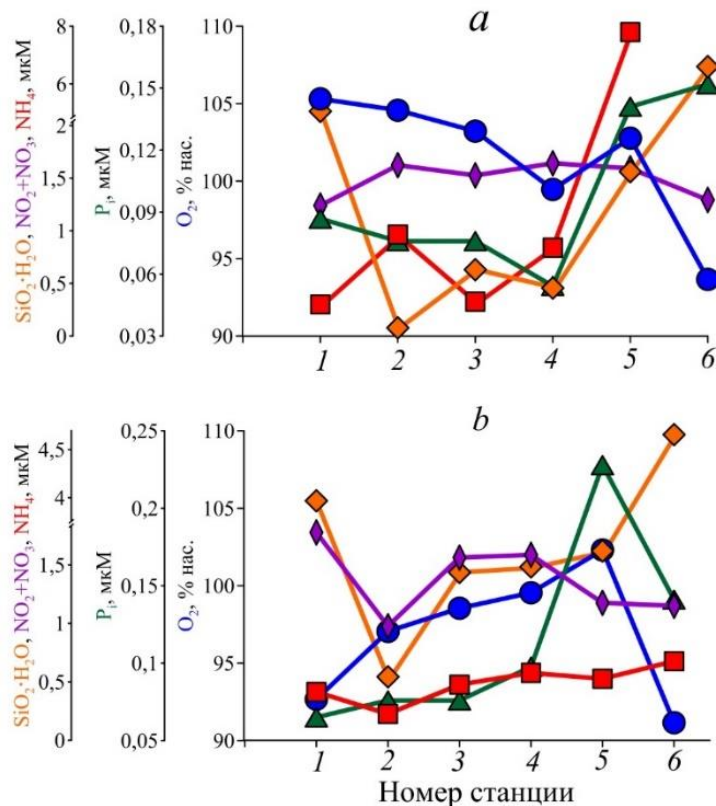
В сентябре во всей толще вод преобладает поступление черноморских вод (рис. 3, *c, d*). В результате масштабы распреснения в западной части разреза ограничиваются верхним двухметровым слоем (рис. 2, *d*). В центральной части Керченского пролива отмечены повышенные величины солености, которые в этот период превосходили летние значения (рис. 2, *b, d*), что подтверждает предположение о вкладе черноморских вод (рис. 3). Градиент температуры в центральной части разреза составил всего $\sim 1^\circ\text{C}$ на 10 м глубины (рис. 2, *c*). В водах Таманского залива в сентябре зафиксированы максимальная температура ($26,3^\circ\text{C}$) и максимальная соленость (до 19,4‰). Термохалинные характеристики, наблюдаемые в Таманском заливе, и слабый водообмен (средняя скорость течения 2,2 см/с) отразились на гидрохимических характеристиках вод. Ослабление динамики вод в Таманском заливе и высокую вероятность формирования слабых круговых течений ранее уже связывали со строительством Тузлинской дамбы⁸ [1].

Гидрохимический анализ вод.

Как было показано выше, в июле в поверхностном горизонте гидрохимическая структура вод определялась вкладом черноморских вод, в придонном – азовских (рис. 3, *a*). Можно отметить, что в этот период преобладал смешанный тип влияния динамики вод [11].

Концентрации гидрохимических параметров в поверхностном и придонном слоях вод в июле 2020 г. показаны на рис. 4. В этот период в толще вод Керченского пролива наблюдалось слегка повышенное содержание биогенных веществ (кроме кремнекислоты): в среднем концентрация фосфатов была 0,11 мкМ, ионов аммония 0,54 мкМ, суммы нитратов/нитритов 1,43 мкМ. Концентрация кислорода в среднем составила 230 мкМ, а степень насыщения вод кислородом достигала 100%. Максимальные концентрации биогенных веществ отмечены в поверхностном слое Таманского залива: концентрация ионов аммония достигала 7,79 мкМ, сумма нитратов/нитритов 1,59 мкМ, кремнекислоты 6,60 мкМ (рис. 4, *a*). При этом концентрация кислорода снижалась до 215 мкМ, степень насыщения вод кислородом – до 93%. В придонном слое вод Таманского залива концентрации биогенных веществ были значительно ниже: 0,6 мкМ в среднем для ионов аммония, 1,16 мкМ для суммы нитратов/нитритов, 3,1 мкМ для кремнекислоты (рис. 4, *b*). Повышенные значения биогенных веществ в акватории Таманского залива, по-видимому, определяются их поступлением с терригенным стоком с расположенных на Таманском п-ове сельскохозяйственных производств. Повышенная температура вод и соленость, а также активное потребление кислорода в придонном слое вод привели к тому, что степень его насыщения в центральной части Таманского залива (ст. б) составила 91%, что на 7% ниже среднего значения по району.

⁸ *Иванов В. А., Шапиро Н. Б.* Моделирование течений в Керченском проливе // Экологическая безопасность прибрежной и шельфовой зон и комплексное использование ресурсов шельфа. 2004. Вып. 10. С. 207–232 ; *Ломакин П. Д., Панов Д. Б., Спиридонова Е. О.* Изменение важнейших составляющих экосистемы Керченского пролива после сооружения тузлинской дамбы. Севастополь, 2008. 74 с. (Препринт / МГИ).



Р и с. 4. Профили гидрохимических характеристик в поверхностном (а) и придонном (b) слоях вод в июле 2020 г.
F i g. 4. Profiles of hydrochemical characteristics in the surface (a) and bottom (b) water layers in July, 2020

В сентябре основной вклад вносили черноморские воды (рис. 3, c, d). Помимо вклада биогеохимической составляющей (протекание фотосинтеза) снижению концентрации биогенных веществ в 2–3 раза по отношению к летним величинам способствовало преобладание черноморских вод в осенний период. Это также отразилось на концентрациях кислорода: величины выросли в среднем до 245 мкМ (104% нас.), в Таманском заливе – до 251 мкМ (110% нас.).

В целом за период исследований в водах Керченского пролива значительных отклонений от обычного распределения гидрохимических параметров не обнаружено [13–15]. Однако поступление дополнительного количества биогенных веществ способствует продукции фитопланктона в поверхностных водах и дальнейшему его оседанию и накоплению в донных отложениях. Интенсивное поступление взвешенного органического вещества в донные отложения приводит к росту доли мелкозернистого материала осадка и увеличению содержания в них органического углерода. Следующим этапом будет изменение окислительно-восстановительных условий в донных отложениях.

Геохимический анализ.

Поверхностный слой современных донных отложений Керченского пролива исследован достаточно подробно ⁹ [27]. В этих работах отмечено, что в прибрежной зоне пролива на мелководье отложения представлены комплексом из песчаного, галечного и ракушечного материала. Ракушечные поля сконцентрированы непосредственно вблизи берегов Керченского п-ова. Пески, представленные кварцевыми и органогенно-обломочными разновидностями, распространяются до глубин 3–5 м. В местах впадин и понижений рельефа в проливе распространены мелкоалевритовые и алеврито-глинистые илы.

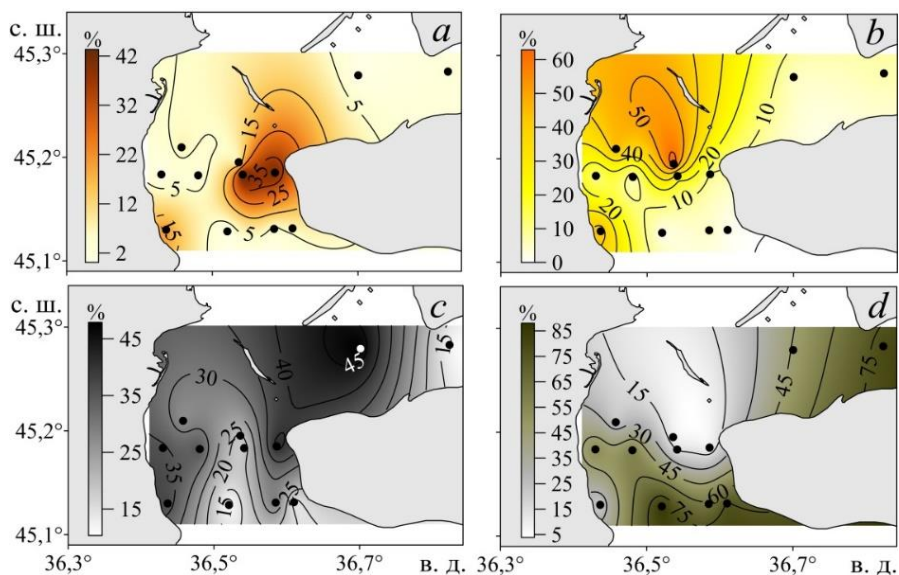
Однако данные ранних исследований объективно устарели, учитывая постоянно возрастающие скорости осадконакопления в проливе и особенно в его кутовых частях [27, 28]. Кроме того, отложения Таманского залива в данных работах практически не исследованы.

В результате гранулометрического анализа проб поверхностного слоя донных отложений Керченского пролива были выделены особенности пространственного распределения основных фракций: гравийной (10–1 мм), песчаной (1–0,1 мм), алеврито-пелитовой (0,1–0,05 мм) и пелито-алевритовой (< 0,05 мм) (рис. 5). Осадочный материал Керченского пролива генетически разнородный, он представлен в основном продуктами разрушения пород Керченского и Таманского п-овов ¹⁰.

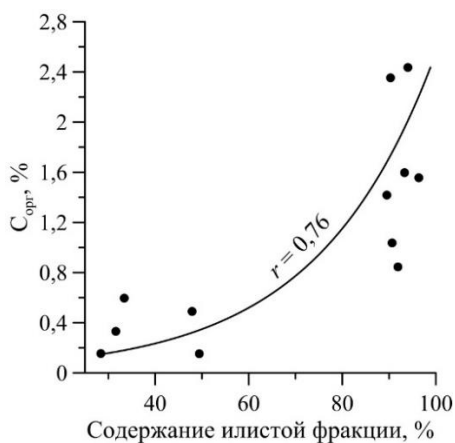
Анализ результатов, полученных в данной работе, показал, что донные отложения Керченского пролива представлены преимущественно пелито-алевритовыми илами с включениями песчаного материала и отдельными включениями ракушечного детрита вблизи берега. В среднем для всех проб доля мелкодисперсного материала составила 70%, из которых 44% пришлось на пелито-алевритовую фракцию и 26% – на алеврито-пелитовую. Установлено, что повышенное содержание илистого материала, в том числе пелитовой фракции (76–86%), отмечается на станциях в южной, юго-западной частях Керченского пролива (90–96%) и в центральной части Таманского залива (90–94%) (рис. 5, *c, d*). Содержание песчаного материала изменяется в диапазоне 2–65%, максимальные величины отмечаются у западного берега в южной части залива, минимальные – у восточного берега в южной части пролива и в Таманском заливе (рис. 5, *b*). Гравийный материал в поверхностном слое отложений представлен фрагментарно и в основном в виде мелких и средних раковин и осколков раковин. Повышенное содержание (41–45%) отмечается на прибрежных станциях у восточного берега (рис. 5, *a*).

⁹ Шнюков Е. Ф., Паланский М. Г. Геологическое значение некоторых геохимических исследований современных донных отложений Керченского пролива. Литолого-геохимические условия формирования донных отложений. Киев : Наукова думка, 1979. С. 3–17 ; Геология шельфа УССР. Керченский пролив / Под ред. Д. Е. Макаренко. Киев : Наукова думка, 1981. 158 с.

¹⁰ Морфология и динамика абразионных берегов Керченского пролива в пределах Украины / Ю. Д. Шуйский [и др.] // Экологічні проблеми Чорного моря. 2003. Вып. 5. С. 421–431.



Р и с. 5. Пространственное распределение в 2020 г. фракций гранулометрического состава донных отложений: *a* – гравийной; *b* – песчаной; *c* – алеврито-пелитовой; *d* – пелито-алевритовой
Fig. 5. Spatial distribution of the fractions of granulometric composition of bottom sediments in 2020: *a* – gravel; *b* – sandy; *c* – aleuritic-pelitic; *d* – pelitic-aleuritic



Р и с. 6. Зависимость между содержанием органического углерода и долей илистой фракции
Fig. 6. Relationship between the organic carbon content and the silt fraction proportion

Содержание $C_{\text{орг}}$ изменяется от 0,2–0,6% сух. масс. в гравийно-песчаных отложениях юго-западной части Керченского пролива до 2,3–2,8% сух. масс. в илистых отложениях Таманского залива со средним значением 1,3% ($n = 14$). Полученные количественные характеристики хорошо согласуются с литературными данными [27]. Повышенные концентрации $C_{\text{орг}}$ наблюдались для проб с максимальной долей (> 90%) илистого материала (рис. 6). Корреляция между содержанием $C_{\text{орг}}$ и иловой фракции составила 0,76, что в первую очередь определяется взаимосвязью с содержанием пелито-алевритового матери-

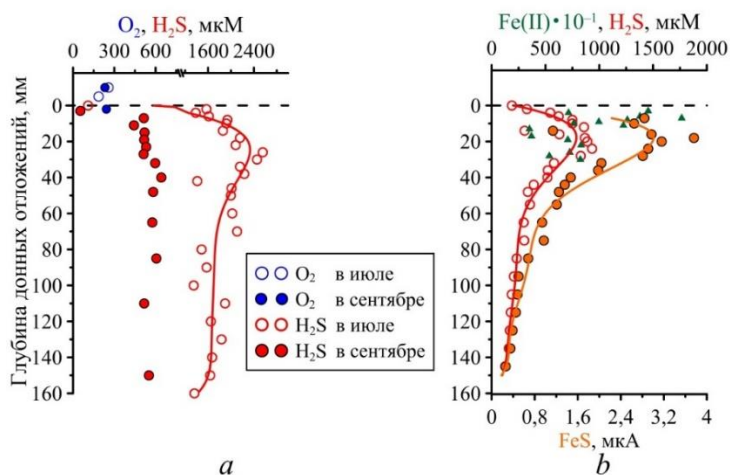
ала (корреляционная зависимость составляет 0,7), тогда как корреляция с алеврито-пелитовой фракцией довольно слабая (0,3). Такой тип взаимосвязи между содержанием $C_{\text{орг}}$ и гранулометрическими фракциями является «классическим» для морских донных отложений и, в частности, для прибрежных отложений Черного моря [27].

Содержание $C_{\text{карб}}$ в поверхностном слое донных отложений изменяется от 0,8–1,6% сух. масс. в Таманском заливе и в южной глубоководной части пролива до 4,6–6,0% сух. масс. на мелководных станциях у западного берега в центральной части Керченского пролива. Выявлено, что минимальные величины $C_{\text{карб}}$ сопровождаются максимальными концентрациями илов (90–96%). Максимальная корреляция (0,6) наблюдается для гравийного и песчаного материала.

Для донных отложений Таманского залива и юго-западной части Керченского пролива получены вертикальные профили содержания $C_{\text{орг}}$ и отмечена тенденция к снижению его концентрации с глубиной. Физико-химические характеристики донных отложений отражаются и на характеристиках химического состава поровых вод в них.

Химический состав поровых вод донных отложений.

В донных отложениях западной части Таманского залива (ст. 5) отмечены анаэробные условия (рис. 7, а). Этому способствовали затрудненный водообмен в акватории залива [3, 4], который приводил к ограничению потока кислорода в придонный слой вод, и мелкодисперсный характер осадка, затрудняющего поступление кислорода в донные отложения. Кроме того, повышенное содержание органического углерода (2,32–2,75%) способствовало потреблению кислорода на его окисление. В июле максимальная концентрация сероводорода достигала 2600 мкМ, к сентябрю его содержание значительно снизилось, хотя характер распределения остался прежним (рис. 7, а). Возможно, это связано с переходом растворенных форм сульфидов в осадок (например, образование пирита).



Р и с. 7. Вертикальные профили поровых вод донных отложений Таманского залива на ст. 5 (а) и 6 (б)

F i g. 7. Vertical profiles of the bottom sediments pore waters in the Taman Gulf at stations 5 (a) and 6 (b)

На ст. 5 в слое осадка 2–14 см отмечается уменьшение концентрации сероводорода, аналогичное уменьшению концентрации $C_{\text{орг}}$ (корреляция составила 0,99), что указывает на прямую зависимость снижения одной концентрации от другой (рис. 8, *a*). Затем в слое осадка 14–18 см концентрация $C_{\text{орг}}$ возрастает, а сероводорода убывает, как результат отмечается отрицательная корреляционная зависимость (–1). Аналогичная ситуация отмечена для зависимости между концентрацией сероводорода и долей илистой фракции в осадке (рис. 8, *b*). Таким образом, можно сделать вывод, что концентрация сероводорода в более глубоких слоях осадка не связана с его геохимическим составом. Корреляционная зависимость для всего проанализированного слоя осадка составила 0,36.

В поверхностном слое донных отложений центральной части Таманского залива (ст. 6) кислород отсутствовал (рис. 7, *b*). Химия поровых вод определялась процессами с участием восстановленных форм железа и серы, а также продуктами их взаимодействия. Преобладающим компонентом поровых вод был сероводород со средней концентрацией 465 мкМ. Его концентрация увеличивалась с глубиной, достигая максимума на 24 мм (933 мкМ), а затем убывала. Также было отмечено присутствие моносульфида железа, распределение которого аналогично распределению сульфидов. В донных отложениях наблюдались анаэробные условия. Для ст. 6 установлена высокая корреляционная зависимость (0,93) между концентрацией сероводорода и содержанием $C_{\text{орг}}$ (рис. 8, *c*), а также между концентрацией сероводорода и долей илистой фракции (0,87) (рис. 8, *d*).

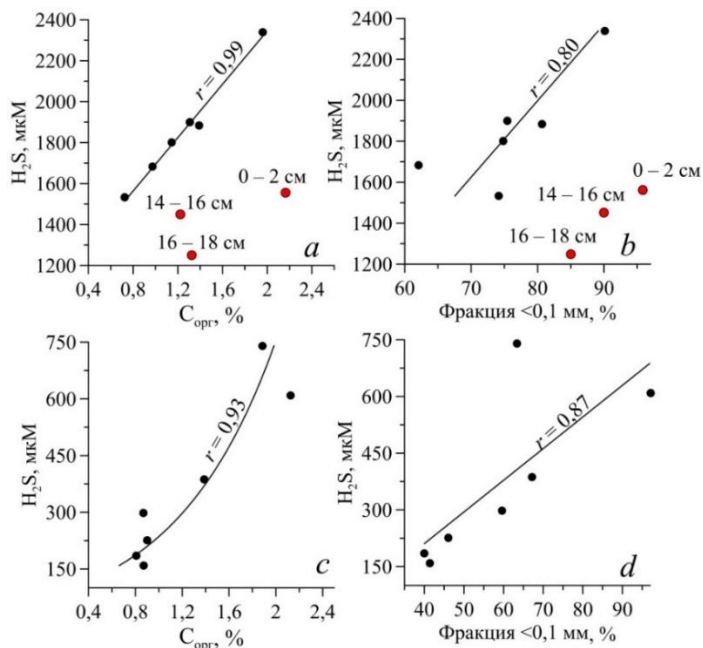
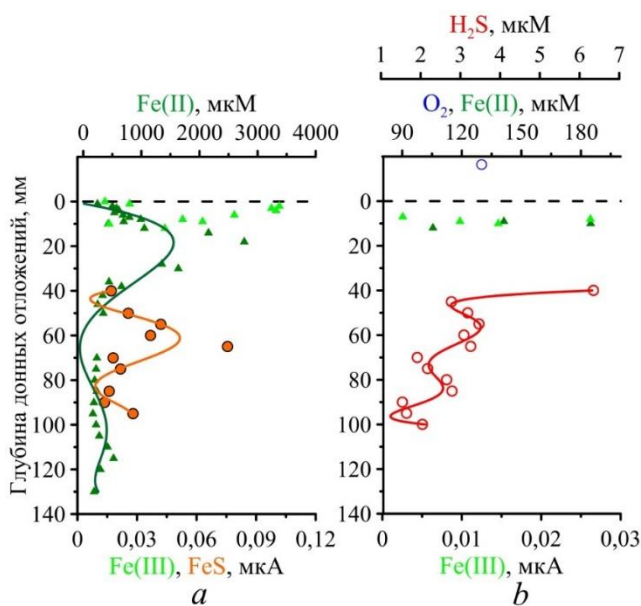


Рис. 8. Зависимость между концентрациями H_2S в поровых водах и $C_{\text{орг}}$ на ст. 5 (*a*) и 6 (*c*), H_2S и содержанием илистой фракции на ст. 5 (*b*) и 6 (*d*) в донных отложениях

Fig. 8. Relationships between the concentration of H_2S in pore water and $C_{\text{орг}}$ at stations 5 (*a*) and 6 (*c*), and that of H_2S and the silt fraction content at stations 5 (*b*) and 6 (*d*) in bottom sediments



Р и с. 9. Вертикальные профили поровых вод донных отложений в юго-западной части Керченского пролива на ст. 7 (a) и 8 (b)

F i g. 9. Vertical profiles of the bottom sediments pore waters in the southwestern part of the Kerch Strait at stations 7(a) and 8(b)

Несмотря на то что в прибрежных районах Керченского п-ова со стороны Черного моря активные гидродинамические процессы способствовали поступлению кислорода в придонный слой вод (рис. 2, 3), в поверхностном слое осадка на станциях в юго-западной части (ст. 7, 8) кислород отсутствовал. Основными компонентами поровых вод здесь являлись восстановленные формы железа (рис. 9). Поровые воды отличались высоким содержанием Fe(II), максимум был отмечен на 18 мм (2769 мкМ), что сопоставимо с его концентрацией в наиболее антропогенно нагруженных акваториях Севастопольского региона [29], с глубиной концентрация уменьшалась. Средняя концентрация Fe(II) составила 626 мкМ. Таким образом, в верхнем слое донных отложений были зафиксированы субкислородные условия.

Выводы

Получены новые комплексные экспедиционные данные, включающие гидролого-гидрохимические характеристики вод и геохимические характеристики донных отложений для акватории Керченского пролива, имеющей приоритетное значение для развития социально-экономического потенциала региона. Полученные данные по изменению химических характеристик поровых вод позволили выделить районы, где формирование донных отложений происходит в субкислородных и анаэробных условиях. В юго-западной части Керченского пролива отмечены субкислородные условия, в районе Таманского залива – анаэробные. Анализ влияния различных факторов (вертикальные профили температуры и солености, концентрация кислорода и степень насыщения

придонных вод кислородом, течения, содержание органического углерода и илистого материала) на состояние морской экосистемы пролива в условиях антропогенной нагрузки позволил оценить окислительно-восстановительные условия в толще донных отложений. Показано, что активная эксплуатация большинства прибрежных районов привела к тому, что в толще отложений основные процессы определялись реакциями с участием восстановленных соединений железа и серы. Установлено, что затрудненный водообмен в районе Таманского залива и накопление органического вещества в донных отложениях за счет поступления значительного количества взвеси привели к ограничению потока кислорода в придонный слой вод, а мелкодисперсный характер осадков затруднял поступление кислорода в донные отложения. В результате этого произошло заиливание Таманского залива, интенсивное потребление кислорода на окисление органического вещества и развитие анаэробных условий, появление сероводорода уже в поверхностном слое донных отложений.

Отсутствие кислорода и появление сероводорода вызывает угнетение дыхания и массовую гибель донных организмов. Таким образом, установлено, что зафиксированные в настоящее время окислительно-восстановительные условия в верхнем слое отложений привели к формированию зон экологического риска в экосистеме Керченского пролива.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Брянцев В. А.* Возможные экологические последствия сооружения Тузлинской дамбы (Керченский пролив) // Морской экологический журнал. 2005. Т. 4, № 1. С. 47–50.
2. *Еремеев В. Н., Иванов В. А., Ильин Ю. П.* Океанографические условия и экологические проблемы Керченского пролива // Морской экологический журнал. 2003. Т. 2, № 3. С. 27–40.
3. *Ломакин П. Д., Боровская Р. В.* Характеристика современного состояния системы течений в Керченском проливе на базе спутниковых и контактных наблюдений // Исследование Земли из космоса. 2006. № 6. С. 65–72.
4. *Фомин В. В., Иванов В. А.* Совместное моделирование течений и ветрового волнения в Керченском проливе // Морской гидрофизический журнал. 2007. № 5. С. 3–20.
5. *Orekhova N. A., Kononov S. K.* Oxygen and Sulfides in Bottom Sediments of the Coastal Sevastopol Region of Crimea // Oceanology. 2018. Vol. 58. P. 679–688. doi:10.1134/S0001437018050107
6. *Diaz R. J.* Overview of Hypoxia around the World // Journal of Environmental Quality. 2001. Vol. 30, iss. 2. P. 275–281. doi:10.2134/jeq2001.302275x
7. 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. doi:10.1016/S0098-3004(03)00006-2
8. Natural and human-induced hypoxia and consequences for coastal areas: synthesis and future development / J. Zhang [et al.] // Biogeosciences. 2010. Vol. 7. P. 1443–1467. doi:10.5194/bg-7-1443-2010
9. *Лосовская Г. В.* Об индикаторных и толерантных видах полихет (на примере северо-западной части Черного моря) // Экологическая безопасность прибрежной и шельфовой зон и комплексное использование ресурсов шельфа. 2011. Вып. 25, т. 1. С. 327–334.
10. Распространение вод из Керченского пролива в Черное море / А. А. Алескерова [и др.] // Морской гидрофизический журнал. 2017. № 6. С. 53–64. doi:10.22449/0233-7584-2017-6-53-64

11. *Горячкин Ю. Н., Кондратьев С. И., Лисиченко А. Д.* Гидролого-гидрохимические характеристики и динамика вод в Керченском проливе в марте 2004 г. // Экологическая безопасность прибрежной и шельфовой зон и комплексное использование ресурсов шельфа. 2005. № 12. С. 108–119.
12. *Котельянец Е. А., Коновалов С. К.* Тяжелые металлы в донных отложениях Керченского пролива // Морской гидрофизический журнал. 2012. № 4. С. 50–60.
13. Комплексные исследования Керченского пролива / В. В. Сапожников [и др.] // Океанология. 2011. Т. 51, № 5. С. 951–953.
14. *Жугайло С. С.* Мониторинг качества вод Керченского пролива и предпроливной зоны Черного моря в современных условиях // Системы контроля окружающей среды. 2015. Вып. 1 (21). С. 63–66.
15. Динамика основных гидрохимических характеристик качества вод Керченского пролива в современных условиях / С. С. Жугайло [и др.] // Труды Южного научно-исследовательского института рыбного хозяйства и океанографии. 2011. Т. 49. С. 137–146.
16. *Gurov K. I., Kurinnaya Yu. S., Kotelyanets E. A.* Features of Accumulation and Spatial Distribution of Microelements in Bottom Sediments of the Crimea Coastal Regions // Ed. T. Chaplina. Cham, Switzerland : Springer Geology, 2021. P. 119–130. (Processes in GeoMedia Series, vol. III). https://doi.org/10.1007/978-3-030-69040-3_12
17. *Немировская И. А., Завьялов П. О., Храпцова А. В.* Углеводороды в водах и донных осадках Керченского пролива // Водные ресурсы. 2021. Т. 48, № 2. С. 183–193. doi:10.31857/S0321059621020085
18. Содержание и состав углеводородов в воде и осадках в районе Керченского пролива / И. А. Немировская [и др.] // Доклады Российской академии наук. Науки о Земле. 2020. Т. 492, № 1. С. 118–123. doi:10.31857/S2686739720050175
19. *Тихонова Е. А., Бурдиян Н. В., Соловьёва О. В.* Химико-микробиологическая характеристика вод и донных отложений Керченского пролива и прилегающих акваторий // Морской биологический журнал. 2017. Т. 2, № 3. С. 75–85. doi:10.21072/mbj.2017.02.3.07
20. *Клёнкин А. А., Агапов С. А.* Динамика распределения нефтепродуктов в воде и донных отложениях Азовского и Черного морей после аварии судов в Керченском проливе // Водные ресурсы. 2011. Т. 38, № 2. С. 214–222.
21. *Матишов Г. Г., Инжебейкин Ю. И., Савицкий П. М.* Воздействие на среду и биоту аварийного разлива нефтепродуктов в Керченском проливе в ноябре 2007 г. // Водные ресурсы. 2013. Т. 40, № 3. С. 259–273.
22. *Еремеев В. Н., Коновалов С. К., Романов А. С.* Особенности распределения кислорода и сероводорода в водах Черного моря в зимне-весенний период // Морской гидрофизический журнал. 1997. № 4. С. 32–46.
23. *Weiss R. F.* The solubility of nitrogen, oxygen and argon in water and seawater // Deep Sea Research and Oceanographic Abstracts. 1970. Vol. 17, iss. 4. P. 721–735. doi:10.1016/0011-7471(70)90037-9
24. *Люцарев С. В.* Определение органического углерода в морских донных отложениях методом сухого сжигания // Океанология. 1986. Т. XXVI, вып. 4. С. 704–708.
25. *Brendel P. J., Luther III G. W.* Development of a Gold Amalgam Voltammetric Microelectrode for the Determination of Dissolved Fe, Mn, O₂, and S(–II) in Porewaters of Marine and Freshwaters Sediments // Environmental Science & Technology. 1995. Vol. 29, iss. 3. P. 751–761. doi:10.1021/es00003a024
26. *Luther III G. W., Brendel P. J., Lewis B. L.* Simultaneous measurement of O₂, Mn, Fe, Γ, and S(–II) in marine pore waters with a Solid-State voltammetric microelectrode // Limnology and Oceanography. 1998. Vol. 43, iss. 2. P. 325–333. doi:10.4319/lo.1998.43.2.0325
27. Органический углерод и карбонатность современных донных отложений Керченского пролива / Е. И. Овсянный [и др.] // Геохимия. 2015. № 12. С. 1120–1131. doi:10.7868/S0016752515120079

28. Хрусталеv Ю. П., Денисов В. И. Некоторые особенности распределения и интенсивность осаднения взвешенного материала в Керченском предпроливье Черного моря // *Океанология*. 2001. Т. 41, № 6. С. 945–954.
29. Окислительно-восстановительные условия и характеристики донных отложений бухт Севастопольского региона / Ю. С. Куриная [и др.] // *Экологическая безопасность прибрежной и шельфовой зон моря*. 2022. № 1. С. 42–54. doi:10.22449/2413-5577-2022-1-42-54

Об авторах:

Гуров Константин Игоревич, младший научный сотрудник, отдел биогеохимии моря, ФГБУН ФИЦ МГИ (299011, Россия, г. Севастополь, ул. Капитанская, д. 2), **ORCID ID: 0000-0003-3460-9650**, **ResearcherID: L-7895-2017**, gurovki@gmail.com

Гурова Юлия Сергеевна, ведущий инженер-исследователь, отдел биогеохимии моря, ФГБУН ФИЦ МГИ (299011, Россия, г. Севастополь, ул. Капитанская, д. 2), **ORCID ID: 0000-0002-9826-4789**, **ResearcherID: AAB-5628-2019**, kurinnaya-jul@yandex.ru

Орехова Наталья Александровна, ведущий научный сотрудник, зав. отделом биогеохимии моря, ФГБУН ФИЦ МГИ (299011, Россия, г. Севастополь, ул. Капитанская, д. 2), кандидат географических наук, **ORCID ID: 0000-0002-1387-970X**; **ResearcherID: I-1755-2017**; **Scopus Author ID: 35784884700**; natalia.orekhova@mhi-ras.ru

Коновалов Сергей Карпович, директор ФГБУН ФИЦ МГИ (299011, Россия, г. Севастополь, ул. Капитанская, д. 2), доктор географических наук, член-корреспондент РАН, **ORCID ID: 0000-0002-5200-8448**, **ResearcherID: F-9047-2014**, sergey_konovarov@yahoo.com