

Основной ионный состав вод Керченского пролива и прилегающих акваторий

Н. Ю. Андрулионис [✉], И. Б. Завьялов, С. А. Рождественский

Институт океанологии им. П. П. Ширшова РАН, Москва, Россия
[✉] *natalya@ocean.ru*

Поступила в редакцию 14.06.2023; одобрена после рецензирования 25.10.2023;
принята к публикации 15.11.2023.

Аннотация

Цель. Изучение влияния процессов обмена вод между Черным и Азовским морями на характеристики основного ионного состава (ОИС) и другие гидрохимические показатели вод Керченского пролива, а также влияния изменений относительного содержания главных ионов солевого состава вод на точность определения значения солёности – цель настоящей работы. Проведены исследования трансформации ОИС при смешении морских поверхностных вод и вод Таманского залива в Керченском проливе. Сделана оценка ошибок при расчете солёности с использованием стандартных методов для вод Керченского пролива, северо-восточной части Черного моря и Таманского залива.

Методы и результаты. Концентрации главных ионов, определяющих ОИС, в поверхностных водах Керченского пролива, Черного моря и Таманского залива в 2019–2023 гг. определены методом потенциометрического титрования. Значения солёности вод были получены четырьмя различными способами.

Выводы. Установлено, что поверхностным водам из северо-восточной части Черного моря соответствует солёность ~ 18,66, рассчитанная суммой главных ионов, что соответствует значению практической солёности ~ 18,10, рассчитанной по данным *CTD*-зонда. Основной ионный состав этих вод характеризуется в среднем следующим относительным содержанием главных ионов: $\text{Cl}^- = 54,1\%$, $\text{SO}_4^{2-} = 8,2\%$, $\text{HCO}_3^- = 1\%$, $\text{Na}^+ = 30,8\%$, $\text{K}^+ = 1,3\%$, $\text{Ca}^{2+} = 1,3\%$, $\text{Mg}^{2+} = 3,4\%$. Показано, что воды Керченского пролива даже при одинаковой солёности могут иметь различное соотношение главных ионов, имеющее большую пространственную и временную изменчивость, значительную роль в которой играет поступление вод из мелководного Таманского залива. Наибольшие различия наблюдались между суммой главных ионов и практической солёностью, для вод Керченского пролива они составили ~ 2,5%. Ионные вариации способствовали занижению значений при расчете практической солёности во всех исследуемых водах. При расчете солёности с использованием хлорного коэффициента отклонения от суммы ионов составили ~ 2%, при использовании уравнения *TEOS-10* ~ 1%.

Ключевые слова: Керченский пролив, Черное море, Таманский залив, Азовское море, определение солёности, солёность, основной ионный состав, главные ионы, водообмен

Благодарности: исследования были выполнены при поддержке Российского научного фонда, грант № 21-17-00191. Авторы выражают благодарность всем участникам экспедиций в Черное море и Керченский пролив в 2019–2023 гг. Отдельно благодарим к. б. н. Г. А. Колочкину, сотрудников лаборатории экологии прибрежных донных сообществ ИО РАН, участников экспедиций 2021 г. за доставку проб из Таманского залива.

Для цитирования: Андрулионис Н. Ю., Завьялов И. Б., Рождественский С. А. Основной ионный состав вод Керченского пролива и прилегающих акваторий // Морской гидрофизический журнал. 2024. Т. 40, № 1. С. 87–107. EDN HEHNBE.

Major Ion Composition of Waters in the Kerch Strait and the Adjacent Areas

N. Yu. Andrulionis , I. B. Zavialov, S. A. Rozhdestvenskiy

Shirshov Institute of Oceanology, Russian Academy of Sciences, Moscow, Russia
 natalya@ocean.ru

Abstract

Purpose. The work is purposed at studying the influence of water exchange processes between the Black and Azov seas upon the characteristics of major ion composition (MIC) and other hydrochemical indicators of the Kerch Strait waters, as well as the impact of changes in the relative content of major ions of water salt composition upon the accuracy in determining salinity values. The MIC transformation during mixing of the sea surface waters and the Taman Bay ones in the Kerch Strait is investigated. The errors in calculating salinity by the standard methods are assessed for the Kerch Strait, the northeastern Black Sea and the Taman Bay waters.

Methods and Results. The concentrations of major ions determining MIC in the Kerch Strait, Black Sea and Taman Bay surface waters in 2019–2023 were defined by the potentiometric titration method. The water salinity values were obtained in four different ways.

Conclusions. It was established that the salinity value ~ 18.66 calculated by a sum of the major ions corresponds to the surface waters in the northeastern part of the Black Sea, that conforms to the practical salinity value ~ 18.10 calculated using the CTD probe data. On the average, MIC of these waters is characterized by the following relative content of major ions: $\text{Cl}^- = 54.1\%$, $\text{SO}_4^{2-} = 8.2\%$, $\text{HCO}_3^- = 1\%$, $\text{Na}^+ = 30.8\%$, $\text{K}^+ = 1.3\%$, $\text{Ca}^{2+} = 1.3\%$ and $\text{Mg}^{2+} = 3.4\%$. It is shown that the Kerch Strait waters, even in case of their similar salinity, can have different ratios of the major ions characterized by high spatial and temporal variability which, in its turn, is subjected to a significant impact of the waters inflowing from the shallow Taman Bay. The largest differences were between the sum of major ions and the practical salinity. For the Kerch Strait waters, the differences averaged $\sim 2.5\%$. The ionic variations contributed to underestimating the practical salinity values calculated for all the waters under study. In calculating salinity using the chlorine coefficient, the deviations from the sum of ions constituted $\sim 2\%$, whereas those obtained using the TEOS-10 equations – $\sim 1\%$.

Keywords: Kerch Strait, Black Sea, Taman Bay, Sea of Azov, determination of salinity, salinity, major ion composition, major ions, water exchange

Acknowledgments: The research was carried out with the support of Russian Science Foundation, grant No. 21-17-00191. The authors are grateful to all the participants of the expeditions in the Black Sea and the Kerch Strait in 2019–2023. Special thanks to Ph.D. G. A. Kolyuchkina, as well as to the employees of the Laboratory of Ecology of Coastal Bottom Communities (IO, RAS) and the participants of the expeditions in 2021 for delivery of the samples from the Taman Bay.

For citation: Andrulionis, N.Yu., Zavialov, I.B. and Rozhdestvenskiy, S.A., 2024. Major Ion Composition of Waters in the Kerch Strait and the Adjacent Areas. *Physical Oceanography*, 31(1), pp. 79-98.

Введение

Керченский пролив входит в состав акватории Азовского моря и соединяет его с Черным морем. Западным берегом пролива является Керченский п-ов Крыма, восточным – Таманский п-ов. Ширина пролива 4,5–15 км, наибольшая глубина 18 м. Пролив играет важную роль в формировании особенностей гидролого-гидрохимического режима Азово-Черноморского бассейна, является одним из главных промысловых районов и важной судоходной магистралью [1]. Основными факторами, влияющими на формирование соле-

вого состава вод Керченского пролива, являются сезонность поступления материкового стока и осадков, поступление вод из лиманов и лагун, окружающих морские заливы, а также водообмен с Черным и Азовским морями. Сложные процессы формирования вод в Керченском проливе приводят к тому, что значения солёности способны изменяться в довольно широких пределах 9,5–19, а ионные вариации приводят к ошибкам (до 3%) при ее определении [2, 3].

Научный этап исследования гидрохимических характеристик вод Черного моря начался в 1890 г., Азовского моря – в 1873 г. [1, 4], а их всестороннее исследование в нашей стране началось с 1920-х гг. Начальные знания по гидрохимии Черного и Азовского морей представлены в работах ¹⁻³. В 1970-х и 1980-х гг. интенсивно исследовались в основном процессы продукции и окисления сероводорода, продукции и потребления органического углерода и т. д. В литературных источниках, как правило, можно найти результаты исследования отдельных элементов основного ионного состава (ОИС) вод Черного ¹ [1, 5, 6] и Азовского [4] морей. На сегодняшний день хорошо изучена карбонатная система Черного моря, описанию результатов исследований посвящен ряд работ [1, 7–11]. Некоторые гидрохимические характеристики вод Азовского моря приведены в работах ^{4, 5} [12–15]. К сожалению, опубликованных данных о концентрациях главных ионов химического состава вод Азовского моря, а также Керченского пролива и Таманского залива авторам найти не удалось.

В эпоху глобального изменения климата, выражающегося в увеличении максимальных среднемесячных летних и минимальных зимних значений температуры, уменьшении концентрации льда в Азовском море, а также в увеличении антропогенной нагрузки на водные ресурсы его бассейна, изменении гидрохимических свойств Азовского, а следовательно, и Черного морей неизбежны. Они приводят к уменьшению приходной части пресноводного баланса и повышению солёности, загрязнению вод, изменению их биоценозов – видового состава гидробионтов и продуктивности отдельных компонентов гидроэкосистем [16–20].

Водный баланс Азовского моря регулируется речным стоком (~ 50% баланса), притоком черноморских вод через Керченский пролив, водообменом с оз. Сиваш, осадками и испарением ⁴. За счет большого поступления пресной воды в основном из рек Дон и Кубань и ограниченного водообмена с Черным морем гидрохимические свойства вод отдельных частей Азовского моря значительно различаются. Ранние исследования показали, что солёность в основной части моря в период 1952–2007 гг. изменялась в интервале 10–12, в цен-

¹ Скопинцев Б. А. Формирование современного химического состава вод Черного моря. Л. : Гидрометеиздат, 1975. 336 с.

² Книпович Н. М. Гидрологические исследования в Азовском море // Труды Азово-Черноморской научно-промышленной экспедиции. Загорск, 1932. Вып. 5. С. 3–97.

³ Гидрологический справочник морей СССР. Т. III : Азовское море / Под. ред. Н. М. Книповича и Г. Р. Брегмана. Л. ; М., 1936. Вып. 1. 222 с.

⁴ Бронфман А. М., Дубинина В. Г., Макарова Г. Д. Гидрологические и гидрохимические основы продуктивности Азовского моря. М. : Пищевая промышленность, 1979. 288 с.

⁵ Climatic atlas of the Sea of Azov 2008 / G. G. Matishov [et al.]. Washington : United States Government Publishing Office, 2008. 148 p. (International Ocean Atlas and Information Series ; Vol. 11 ; NOAA Atlas NESDIS 65). EDN VMOGFB. URL: <https://repository.library.noaa.gov/view/noaa/1135> (date of access: 17.01.2024).

тральной части моря – в интервале 11–12,5, в Таганрогском заливе – в интервале 1–9 [21, 22]. Исторически воды Керченского пролива имеют большую изменчивость солености, 9,5–19 (см. работу ⁴ и [2, 4, 23]).

Развитие сельского хозяйства, особенно орошаемого земледелия, вызывает поступление с возвратными водами в реки, а следовательно, и в Азовское море большого количества солей хлора, сульфатов, металлов, биогенных и органических веществ. Это наряду с сокращением речного стока влияет и на повышение общей минерализации речных и морских вод, которая определяет экосистему моря и хозяйственную деятельность человека в акватории. Повышение солености приводит к формированию стратификации водных масс с дефицитом кислорода, что увеличивает риск гибели гидробионтов, снижает уровень первичного продуцирования органического вещества, а также уменьшает скорость самоочищения морских вод ^{4, 6} [12, 14, 18, 21, 24, 25]. Возрастающий из года в год сток сульфатов создает предпосылки для сероводородного загрязнения морских вод ⁴ [4, 15, 16]. Для последних лет периода маловодья Дона средняя соленость азовоморских вод достигает значений > 14 [25]. Хотя соленость Азовского моря изучают еще с конца XIX в., до сих пор исследование динамики и прогноз изменения ее режима являются актуальными.

Воды Керченского пролива представляют собой трансформированные азово-черноморские водные массы, некоторые исторические гидрохимические характеристики этих вод (до 1981 г.) приведены в работе [4]. Основными факторами, влияющими на формирование ОИС вод Керченского пролива, являются: сезонность поступления материкового стока и осадков, поступление вод из заливов, а также водообмен с Черным и Азовским морями. Сложные процессы формирования ОИС керченских вод приводят к гидрохимическим аномалиям состава, вызывающим ошибки (до 3%) при определении солености стандартными методами (расчеты по электропроводности и хлорности). Керченские воды отличаются от океанической воды пониженным содержанием хлоридов и повышенным – сульфатов и гидрокарбонатов [3].

Отдельной частью Керченского пролива является Таманский залив. Он расположен у его восточного берега, между косой Чушка и Тузлинской косой, и вдается в материк на 16 км, имеет среднюю глубину 5 м и ширину у входа в море 8 км ⁷. Некоторые гидрохимические характеристики вод Таманского залива приводятся в [16]. Залив примыкает непосредственно к Керченскому проливу, и его влияние на свойства керченских вод может быть существенным.

Черное море является меромиктическим водоемом с явно выраженной двухслойной структурой водной толщи, кислородным и анаэробным слоями [26]. Гидрохимические и термohалинные свойства верхнего слоя зависят от речного стока (~ 1000 рек) и взаимодействия с атмосферой в различных временных масштабах, а свойства нижнего слоя – от влияния мраморноморских (средиземноморских) вод, поступающих с нижнебосфорским течением, а также от процессов вертикального обмена. В прибрежной зоне и в Керченском проливе по-

⁶ Добровольский А. Д., Залогин Б. С. Моря СССР. М. : Изд-во МГУ, 1982. 192 с.

⁷ География Кубани : энциклопедический словарь / [авт.-сост. И. П. Лотышев]. Майкоп : Афиша, 2006. 527 с.

верхностный водный слой характеризуется более низкой соленостью по сравнению с более глубокими слоями с повышенными горизонтальными градиентами солености. Соленость поверхностных вод в центральной части Черного моря принимается равной 17,85–18,40, а на северо-западном шельфе 14–16 (до 17,90) (исходя из расчета по электропроводности [22]) [27].

Многочисленные исследования сложных гидрохимических структур Черного и Азовского морей свидетельствуют об их существенных отличиях от аналогичных структур Мирового океана. От ионных вариаций зависят важнейшие физические характеристики, такие как соленость и плотность, а также точность их определения непрямими методами. Возможность точного расчета солености по электропроводности определяется постоянством относительного ионно-солевого состава морской воды, а его нарушение приводит к ошибкам [27–29]. Ранее было замечено, что вариации ионного состава даже при одинаковых значениях хлорности могут вызывать различия в значениях электропроводности [4]. В 70-х годах XX в. эти отличия в водах Черного и Азовского морей послужили основанием при разработке соотношений для более точного расчета солености с применением хлорного коэффициента [4, 6].

Знание содержания и распределения компонентов ОИС в области смешения вод расширит понимание процессов их формирования и транспорта в Керченском проливе. Необходимость всесторонних оценок характеристик морских вод и развитие системы мониторинга особенно актуальны в настоящее время в условиях климатических изменений и усиления антропогенного воздействия на водные ресурсы. Полученные знания могут помочь в поиске оптимальных решений при их эксплуатации, развитии технологий моделирования гидрохимических процессов и динамики вод в проливе. Цель данной работы – изучение ОИС вод в Керченском проливе и прилегающих акваториях Черного, Азовского морей и Таманского залива и их водообмена, а также оценка влияния ионных вариаций солевого состава на точность определения солености вод в районах исследования.

Материалы и методы

Местоположение станций. Отбор проб из поверхностного слоя вод осуществлялся с борта МНИС «Ашамба» и во время береговых экспедиций в Керченский пролив, Таманский залив, северо-восточную часть Черного моря и южную часть Азовского моря.

Образцы воды из Керченского пролива были получены с борта МНИС «Ашамба» в 2019–2023 гг., из Черного моря – по пути следования из Голубой бухты (г. Геленджик) в Керченский пролив на расстоянии до 10 км от берега 21 сентября 2022 г. (этап экспедиции 2022 г. под названием ЧМА).

В ходе береговых экспедиций были получены образцы воды в следующих районах: в Керченском проливе 15–16 декабря 2021 г. (от г. Керчь до села Яковенково) (опубликовано в [3]); в апреле, июле и ноябре 2021 г. – в районе побережья у косы Чушка (район порта «Кавказ») и в разных районах Таманского залива, в том числе в прилегающей к заливу лагуне; в Черном море 29 сентября 2022 г. (от г. Анапа до г. Сочи, микрорайон Лазаревское, и у г. Севастополя (этап ЧМБ 2022 г.)); в Темрюкском заливе Азовского моря 10 октября 2020 г. (в районе станицы Голубицкая).

Т а б л и ц а 1
T a b l e 1

Характеристики станций и даты отбора проб воды
Characteristics of stations and dates of water sampling

Дата отбора проб / Date of sampling	Акватория / Water area	Станция (место отбора проб) / Station (location of sampling)	Координаты станций / Station coordinates	
			° с. ш. / ° N	° в. д. / ° E
1	2	3	4	5
01.05.2019 / May 01, 2019	Керченский пролив – Феодосийская бухта / Kerch Strait – Feodosia Bay	0	45,089490	35,520194
		1a	44,987528	35,835800
		6	45,012694	36,209528
		24	45,291056	36,461444
		31	45,183333	36,592972
03–04 сентября 2019 г. / September 03–04, 2019		12	45,071708	36,461732
		17	45,103928	36,482090
		20	45,119100	36,555908
		23	45,135783	36,623403
		24	45,288658	36,457697
		28	45,223365	36,535535
		31	45,182142	36,589330
01 июля 2020 г. / July 01, 2020		6	45,016460	36,215190
		16	45,100560	36,468800
		23	45,132810	36,623840
		24	45,291690	36,460600
		30	45,193770	36,567890
		31	45,178270	36,583490
		32	45,034790	36,740890
		36	45,099130	36,741730
		41	45,066560	36,998340
15–16 декабря 2021 г. / December 15–16, 2021	Керченский пролив / Kerch Strait	1	45,349800	36,476900
		2	45,301800	36,460700
		3	45,271700	36,437500
		4	45,244200	36,421200
		5	45,219800	36,405700
		6	45,229700	36,413600
		7	45,178100	36,405900
		8	45,166400	36,410700
		9	45,059200	36,327143
29 сентября 2022 г. / September 29, 2022		1H / 1N	45,349607	36,47619
		4H / 4N	45,1572039	36,554363
		9H / 9N	45,128749	36,546070
		10H / 10N	45,1240664	36,638590
21 марта 2023 г. / March 21, 2023		10	45,1240664	36,638590
		10H / 10N	45,07516	36,625380
10 октября 2020 г. / October 10, 2020		ПК (коса Чушка, около порта «Кав- каз») / PK	45,34686	36,683314
06 апреля 2021 г. / April 06, 2021		(Chushka Spit, near port «Kavkaz»)	45,352445	36,696216
21 ноября 2021 г. / November 21, 2021			45,347494	36,682850
10 октября 2020 г. / October 10, 2020	Темрюкский залив Азовского моря / Temryuk Bay of the Sea of Azov	СГ (станция Голубицкая) / GV (Golubitskaya village)	45,323314	37,27490

Продолжение табл. 1 / Continuation of table 1

1	2	3	4	5	
06 апреля 2021 г. / April 06, 2021	Таманский залив Керченского пролива / Taman Bay of the Kerch Strait	<i>Д</i> (коса Чушка, около залива Дин- ской) / <i>D</i> (Chushka Spit, near Dinskoj Bay)	45,351600	36,699305	
21 ноября 2021 г. / November 21, 2021			45,353811	36,702750	
06 апреля 2021 г. / April 06, 2021		<i>П</i> (Приморский) / <i>P</i> (Primorskiy)		45,270794	36,912798
06 июля 2021 г. / July 06, 2021				45,270998	36,916198
21 ноября 2021 г. / November 21, 2021			45,269542	36,909351	
06 июля 2021 г. / July 06, 2021		<i>С</i> (Сенной) / <i>S</i> (Sennoj)	45,279813	36,976939	
21 ноября 2021 г. / November 21, 2021		<i>Т</i> (станция Тамань) / <i>T</i> (Taman)	45,221259	36,700954	
06 июля 2021 г. / July 06, 2021		<i>ЛП</i> (лагуна в Приморском) / <i>LP</i> (Lagoon in Primorsky)		45,25393	36,898338
21 ноября 2021 г. / November 21, 2021				45,253797	36,896663
21 сентября 2022 г. / September 21, 2022	Черное море, этап ЧМА (Голубая бухта – Керченский пролив) / Black Sea, the BSA stage (Blue Bay – Kerch Strait)	<i>1</i>	44,57105	37,966255	
		<i>2</i>	44,622805	37,773119	
		<i>3</i>	44,660862	37,578031	
		<i>4</i>	44,739155	37,393548	
		<i>5</i>	44,854028	37,309866	
		<i>6</i>	44,908118	37,309154	
		<i>7</i>	44,940812	37,13572	
		<i>8</i>	44,964315	36,950363	
		<i>9</i>	44,997965	36,750853	
		<i>10</i>	45,06947	36,563719	
		<i>11</i>	45,206595	36,463493	
29 сентября 2022 г. / September 29, 2022	Черное море, этап ЧМБ (Анапа – Лазаревское) / Black Sea, the BSC stage (Anapa – Lazarevskoe)	<i>А</i> (Анапа) / <i>A</i> (Anapa)	44,89789	37,306041	
		<i>Н</i> (Новороссийск) / <i>N</i> (Novorosiysk)	44,73275	37,783855	
		<i>С</i> (Севастополь) / <i>S</i> (Sevastopol)	44,615857	33,521145	
		<i>ГБ</i> (Геленджик, Голубая бухта) / <i>BB</i> (Gelendzhik, Blue Bay)	44,576505	37,977587	
		<i>Г</i> (Геленджикская бухта) / <i>G</i> (Gelendzhik Bay)	44,576335	38,024019	
		<i>АО</i> (Архипо-Осиповка) / <i>AO</i> (Arkhipo-Osipovka)	44,357138	38,526734	
		<i>Т</i> (Туапсе) / <i>T</i> (Tuapse)	44,0942	39,072294	
<i>Л</i> (Сочи, Лазаревское) / <i>L</i> (Sochi, Lazarevskoe)	43,909438	39,322485			

Всего за период 2019–2023 гг. было проанализировано 36 проб из Керченского пролива, 10 – из Таманского залива, 21 – из Черного моря и одна – из

Азовского моря. Местоположение, номера станций, их координаты и даты отбора проб приведены в табл. 1, расположение станций на карте показано на рис. 1.



Р и с. 1. Расположение станций отбора проб в 2019–2023 гг. на карте (из *Google Планета Земля Pro*)

Fig. 1. Location of the sampling stations in 2019–2023 on the map (taken from *Google Earth Pro*)

Во время отбора пробы воды помещались в герметичные емкости объемом 0,5 и 1 л и доставлялись в лабораторию в течение нескольких дней для последующего анализа. После определения общей щелочности (AT), общего растворенного неорганического углерода (T_{CO_2}) и pH пробы фильтровались через мембранный фильтр *GF/F Whatman* 0,7 мкм для удаления минеральной и органической взвеси, помещались в стеклянные емкости объемом 250–300 мл, хранились в холодильнике при температуре 4°C и доставались по мере необходимости в течение аналитического периода.

Исследование ионно-солевого состава. Концентрации главных ионов солевого состава (Cl^- , SO_4^{2-} , HCO_3^- , Na^+ , K^+ , Ca^{2+} , Mg^{2+}), выраженные в г/кг, общую щелочность (AT) (в ммоль/кг) и pH вод исследуемых образцов определяли в лаборатории ИО РАН в соответствии с методиками, подобранными первоначально для анализа гипергалинных вод и описанными в [30], но с учетом минерализации черноморской воды. Аналогичные определения концентраций основных ионов и плотности проводились также на образцах стандартной морской воды (СМВ) *IAPSO*, специально предназначенных для калибровки приборов и верификации измерений солености [31]. Сравнение полученных результатов с литературными данными показало хорошую сходимость. Определение концентраций главных ионов в составе исследуемых образцов позволило получить наиболее точные значения солености поверхностных вод Керченского

пролива и его акваторий, рассчитать относительное содержание ионов в составах вод и сульфат-хлорное отношение ($\text{SO}_4^{2-}/\text{Cl}^-$), определить соленость с использованием хлорного коэффициента. Соленость рассчитывалась суммой главных ионов. В работе представлен и анализируется относительный вклад ионов в общую минерализацию исследуемых образцов воды.

Для приготовления растворов реактивов и разбавления проб использовалась деионизированная вода (электропроводность $< 0,2$ мкСм/см). Масса анализируемой пробы измерялась взвешиванием на лабораторных аналитических весах *Ohaus AX 423* (США) первого класса точности с погрешностью $\pm 0,005$ г.

Определение плотности (σ_t). Измерения плотности воды исследуемых образцов проводили в лаборатории ИО РАН с помощью прецизионного плотномера *Anton Paar DMA 5000M* (Австрия) при температуре *in situ* и атмосферном давлении. Калибровку прибора проводили согласно инструкции. Погрешность измерения плотности воды составляет $\pm 10^{-5}$ г/см³. Стандартное отклонение при измерении плотности исследуемых образцов плотномером не превышало $0,02$ кг/м³. Данные плотности представлены в единицах условной плотности (кг/м³).

Определение солености. Расчет солености проводился несколькими способами: по данным *CTD*-зонда (*SeaBird 19plus* до 2021 г. и *CastAway* с 2021 г.) на основе электропроводности была получена практическая соленость (*SP*) (только для вод Керченского пролива); с использованием хлорного коэффициента (S_{Cl}) из соотношения, приведенного в [6]; с использованием суммы главных ионов (*SS*) и значений плотности (SA_p) по уравнению *TEOS-10* (<http://www.TEOS-10.org>, <https://www.teos-10.org/software.htm>). Результаты аналогичных исследований для вод Керченского пролива представлены в [3]. Точность перечисленных выше методов расчета солености приведена в ⁸. Расчет солености зависит от погрешности оборудования и следующих методов:

– с использованием значений плотности до $\pm 3 \cdot 10^{-5}$ г/см³, что эквивалентно ошибке солености $\pm 0,4 \cdot 10^{-2}$;

– с использованием хлорности $0,2 \cdot 10^{-2}$ г/кг;

– с использованием электропроводности $\pm 0,1 \cdot 10^{-2}$ мкСм/см;

– с использованием суммы главных ионов $0,1 \cdot 10^{-1}$ г/кг.

При исследовании ионного состава СМВ в лаборатории ИО РАН и сравнении солености, полученной суммой ионов, со справочной соленостью из [31] обнаружено превышение рассчитанной нами солености на 0,3%. Для образцов воды поверхностного слоя Черного моря с соленостью 18 это эквивалентно 0,05.

Практическая соленость была рассчитана только для вод Керченского пролива, так как только здесь проводилось *CTD*-зондирование.

Результаты

Результаты гидрохимических исследований образцов воды из Керченского пролива, Таманского залива, а также из северо-восточной части Черного моря в период 2019–2023 гг. приведены в табл. 2.

⁸ *Millero F. J.* Chemical Oceanography. Boca Raton : CRC Press, 2013. 591 p. <https://doi.org/10.1201/b14753>

Таблица 2
Table 2

Гидрохимические характеристики образцов воды Керченского пролива и примыкающих к нему акваторий Черного моря и Таманского залива, полученных в 2019–2023 гг.

Hydrochemical characteristics of water samples from the Kerch Strait and adjacent waters of the Black Sea and the Taman Bay obtained in 2019–2023

Станция / Station	Дата / Date	pH	AT, ммоль/кг г/AT, mmol/kg	Соленость / Salinity				Анионы, % / Anions, %			Катионы, % / Cations, %			
				SP	SS	S _{Cl}	SA _p	Cl ⁻	SO ₄ ²⁻	HCO ₃ ⁻	Na ⁺	K ⁺	Ca ²⁺	Mg ²⁺
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15
Керченский пролив – Феодосийская бухта / Kerch Strait – Feodosiya Bay														
0	01.05.2019	8,13	3,21	–	18,24	17,69	17,92	53,49	7,56	0,98	31,99	1,08	1,26	3,64
1a		8,17	2,94	17,09	17,69	17,06	17,23	53,21	7,97	0,92	31,75	1,24	1,23	3,69
6		8,08	2,99	17,43	18,01	17,44	17,43	53,41	7,67	0,93	31,84	1,22	1,26	3,67
24		8,05	2,64	14,71	15,25	14,63	15,00	52,91	8,33	0,97	31,74	1,11	1,30	3,65
31		8,11	2,91	18,05	18,62	18,01	18,16	53,37	7,84	0,87	31,93	1,10	1,30	3,59
-		8,11	2,94	16,82	17,56	16,97	17,15	53,28	7,87	0,93	31,85	1,15	1,27	3,65
-		0,04	0,19	1,27	1,19	1,21	1,12	0,11	0,16	0,04	0,09	0,07	0,02	0,04
Керченский пролив / Kerch Strait														
12	01–08.09.2019	8,25	2,69	18,30	19,04	18,46	18,50	53,47	8,51	0,93	31,10	1,27	1,24	3,49
17		8,34	2,95	18,30	19,01	18,43	18,43	53,56	8,39	0,96	31,13	1,29	1,27	3,40
20		8,42	3,07	18,25	18,84	18,46	18,32	53,88	7,98	0,97	31,05	1,26	1,27	3,58
23		8,26	3,00	18,15	18,94	18,40	18,34	53,54	8,32	0,95	31,03	1,30	1,33	3,53
24		8,17	2,86	18,15	18,76	18,39	18,27	53,62	8,26	0,96	31,05	1,26	1,29	3,56
28		8,21	2,89	18,20	18,85	18,24	17,68	53,80	8,09	0,96	31,04	1,27	1,20	3,64
31		8,21	2,83	18,15	18,90	18,39	18,23	53,40	8,55	0,94	31,07	1,27	1,24	3,54
-		8,26	2,90	18,21	18,91	18,39	18,25	53,61	8,30	0,95	31,07	1,27	1,26	3,53
-		0,08	0,11	0,06	0,09	0,07	0,25	0,16	0,19	0,01	0,03	0,01	0,04	0,07
6		20.07.2020	8,29	2,89	17,90	18,42	17,98	18,04	53,95	8,40	0,98	30,74	1,29	1,24
16	8,29		2,90	17,81	18,34	17,89	17,88	53,79	8,48	0,98	30,93	1,20	1,42	3,20
23	8,19		3,06	17,92	18,36	18,00	17,94	54,09	8,25	0,98	30,80	1,19	1,29	3,39
24	8,22		2,99	18,05	18,40	18,14	17,99	54,30	8,00	0,99	30,84	1,20	1,30	3,37
30	8,13		2,92	17,86	18,35	17,94	17,98	53,89	8,42	0,99	30,67	1,37	1,29	3,38
31	8,14		2,89	17,84	18,20	17,92	17,91	53,70	8,63	0,98	30,54	1,41	1,35	3,38
32	8,14		2,95	17,85	18,38	17,93	18,19	53,91	8,37	1,00	30,56	1,49	1,25	3,42
36	8,18		2,90	17,86	18,25	17,94	17,91	54,12	8,12	1,00	30,56	1,51	1,26	3,42
41	8,24		2,87	17,72	18,12	17,80	17,78	54,11	8,13	1,00	30,57	1,53	1,25	3,41
-	8,20		2,93	18,31	17,87	17,95	17,96	53,99	8,31	0,99	30,69	1,36	1,29	3,38
-	0,06	0,06	0,10	0,08	0,09	0,11	0,18	0,19	0,01	0,13	0,13	0,06	0,06	
9	15–16.12.2021	8,27	2,89	16,8	17,19	16,8	17,1	53,88	8,58	0,96	30,40	1,28	1,38	3,61
8		8,26	2,36	15,89	16,3	15,82	16,11	53,54	9,10	0,86	30,43	1,22	1,25	3,70
7		8,16	2,47	15,86	16,23	15,77	16,17	53,57	8,97	0,88	30,26	1,40	1,35	3,64
6		8,22	2,52	15,94	16,34	15,85	16,2	53,62	8,97	0,86	30,32	1,32	1,34	3,66
5		8,19	2,47	15,87	16,28	15,83	16,06	53,52	9,08	0,88	30,26	1,34	1,30	3,71
4		8,25	2,50	16,00	16,37	15,9	16,29	53,59	9,00	0,86	30,41	1,27	1,30	3,64
3		8,21	2,46	16,06	16,41	15,93	16,25	53,54	9,04	0,86	30,29	1,40	1,30	3,65
2		8,38	2,37	15,8	16,22	15,66	16,16	53,24	9,41	0,83	30,32	1,34	1,28	3,67
1		8,17	2,49	16,04	16,38	15,91	16,22	53,59	8,98	0,87	30,35	1,32	1,34	3,63
-		8,23	2,5	16,03	16,41	15,94	16,28	53,57	9,01	0,87	30,34	1,32	1,32	3,66
-	0,06	0,14	0,28	0,28	0,31	0,3	0,15	0,20	0,03	0,06	0,06	0,04	0,03	
1Н/1Н	29.09.2022	8,00	2,65	–	18,01	17,68	17,98	54,16	8,03	0,92	31,31	1,25	1,21	3,10
4Н/4Н		8,03	3,01	18,58	18,86	18,66	18,71	54,57	7,77	0,91	30,70	1,31	1,36	3,44
9Н/9Н		8,13	3,13	18,57	18,81	18,61	18,77	54,57	7,55	0,97	31,23	1,32	1,21	3,19
10Н/10Н		8,06	3,21	18,53	18,98	18,7	18,88	54,34	7,77	0,98	31,36	1,26	1,20	3,16
-		8,06	3	18,56	18,67	18,41	18,59	54,41	7,78	0,94	31,15	1,29	1,25	3,22
-		0,05	0,22	0,02	0,39	0,42	0,35	0,17	0,17	0,03	0,26	0,03	0,07	0,13

Продолжение табл. 2 / Continuation of table 2

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	
10 10Н/10N - -	21.03. 2023	8,15	2,66	17,28	17,55	17,3	17,66	54,35	8,13	1,00	30,26	1,16	1,45	4,06	
		8,17	2,74	16,23	17,15	16,94	17,53	54,50	8,01	1,00	30,22	1,17	1,34	3,67	
		8,16	2,7	16,75	17,35	17,12	17,59	9,44	1,40	0,17	5,25	0,20	0,24	0,64	
		<i>0,01</i>	<i>0,04</i>	<i>0,53</i>	<i>0,2</i>	<i>0,18</i>	<i>0,07</i>	<i>0,10</i>	<i>0,03</i>	<i>0,00</i>	<i>0,07</i>	<i>0,00</i>	<i>0,01</i>	<i>0,00</i>	
ПК / PK	09.10. 2020	8,12	2,71	-	18,96	18,95	19,11	55,13	7,28	0,88	30,29	1,41	1,42	3,60	
	06.04. 2021	7,56	3,10	-	16,80	16,17	16,55	53,08	9,17	1,23	30,02	1,60	1,29	3,61	
	21.11. 2021	7,63	2,50	-	13,80	13,40	13,75	53,56	8,84	1,09	30,31	1,26	1,38	3,56	
Черное море, этап ЧМА / Black Sea, BSA stage															
1	21.09. 2022	8,31	2,89	-	18,69	18,33	18,75	54,08	8,36	1,00	30,31	1,29	1,36	3,60	
2		8,30	2,98	-	18,82	18,43	18,94	54,04	8,37	0,99	30,44	1,24	1,41	3,51	
3		8,29	2,91	-	18,78	18,43	18,82	54,13	8,32	1,00	30,35	1,19	1,41	3,59	
4		8,32	2,95	-	18,76	18,44	18,89	54,21	8,23	0,96	30,25	1,33	1,46	3,56	
5		8,27	2,94	-	18,74	18,44	18,90	54,27	8,18	0,98	30,29	1,23	1,46	3,59	
6		8,28	2,87	-	18,72	18,43	18,84	54,30	8,16	1,00	30,26	1,28	1,36	3,66	
7		8,31	2,90	-	18,91	18,54	18,89	54,05	8,42	0,98	30,37	1,21	1,35	3,60	
8		8,31	2,93	-	18,78	18,46	18,80	54,23	8,20	0,99	30,40	1,20	1,42	3,56	
9		8,27	2,90	-	18,76	18,45	18,79	54,27	8,18	1,00	30,33	1,23	1,39	3,61	
10		8,28	2,85	-	18,57	18,32	18,71	54,39	8,04	0,99	30,22	1,30	1,42	3,64	
11		8,28	2,85	-	18,70	18,49	18,76	54,53	7,88	0,97	30,45	1,28	1,30	3,59	
-		8,29	2,91	-	18,75	18,43	18,83	54,23	8,21	0,99	30,33	1,25	1,39	3,59	
-		<i>0,02</i>	<i>0,04</i>	-	<i>0,08</i>	<i>0,06</i>	<i>0,07</i>	<i>0,14</i>	<i>0,15</i>	<i>0,01</i>	<i>0,07</i>	<i>0,04</i>	<i>0,05</i>	<i>0,04</i>	
Черное море, этап ЧМБ / Black Sea, BSC stage															
A/A	29.09. 2022	8,11	3,05	-	19,00	18,67	18,87	54,21	7,95	0,93	31,40	1,26	1,20	3,06	
H/N		7,93	3,08	-	17,70	17,32	17,62	53,98	7,98	1,08	31,44	1,34	1,23	2,95	
ГБ/BB		8,08	3,11	-	18,88	18,59	18,68	54,33	7,76	0,96	31,49	1,29	1,11	3,05	
Г/Г		8,15	3,05	-	18,59	18,20	18,46	54,01	8,02	1,01	31,45	1,36	1,18	2,98	
АО/АО		8,01	3,07	-	18,90	18,55	18,77	54,14	7,93	0,98	31,51	1,25	1,19	2,99	
Л/Л		7,97	3,11	-	18,36	18,06	18,22	54,26	7,79	1,02	31,54	1,20	1,20	3,00	
Т/Т		8,03	3,07	-	18,67	18,34	18,70	54,20	7,86	0,99	31,49	1,26	1,23	2,98	
С/С		8,10	3,08	-	18,89	18,54	18,76	54,12	7,98	1,00	31,39	1,23	1,24	3,04	
-			8,04	3,08	-	18,59	18,25	18,47	54,16	7,90	0,99	31,47	1,28	1,19	3,00
-			<i>0,07</i>	<i>0,02</i>	-	<i>0,41</i>	<i>0,43</i>	<i>0,40</i>	<i>0,12</i>	<i>0,09</i>	<i>0,04</i>	<i>0,04</i>	<i>0,05</i>	<i>0,04</i>	<i>0,04</i>
Азовское море / Sea of Azov															
CG/GV	09.10. 2020	7,03	2,16	-	14,81	14,64	14,98	54,53	7,80	0,98	30,04	1,57	1,49	3,59	
Таманский залив / Taman Bay															
Д/Д	06.04. 2021	7,65	3,68	-	18,88	18,28	18,58	53,41	8,66	1,19	29,63	2,12	1,46	3,53	
П/П		7,44	6,97	-	22,12	21,48	22,00	53,56	7,71	2,15	30,17	1,67	1,22	3,53	
П/П	06.07. 2021	8,31	2,87	-	18,64	18,17	18,18	53,77	8,72	0,88	30,47	1,34	1,37	3,46	
С/С		8,38	2,95	-	18,54	18,07	18,23	53,76	8,77	0,88	30,52	1,25	1,35	3,48	
Д/Д	21.11. 2021	7,53	4,21	-	19,50	18,94	19,42	53,58	8,56	1,33	30,20	1,31	1,51	3,51	
Т/Т		7,1	2,49	-	16,07	15,58	15,88	53,46	9,05	0,96	30,37	1,30	1,31	3,55	
П/П		6,68	4,4	-	16,13	15,44	15,85	52,78	8,83	1,99	29,87	1,40	1,61	3,52	
ЛП/LP	06.07. 2021	7,66	3,18	-	39,61	38,66	39,82	53,84	9,30	0,47	29,75	1,23	1,57	3,84	
	21.11. 2021	7,42	5,09	-	26,63	25,99	26,70	53,84	8,66	1,05	29,53	1,43	1,75	3,74	

Примечание. Полу жирным прямым шрифтом показаны средние значения гидрохимических характеристик, полу жирным курсивом – *sd*.

Note: Bold straight font shows the average values of hydrochemical characteristics, bold italic – *sd*.

Кроме основных результатов по каждой пробе здесь перечислены средние по экспедиции значения полученных показателей и среднеквадратические отклонения *standart deviation* (*sd*) между ними. Большие отличия *sd* свидетельствовали о неоднородности, а небольшие – об однородности вод в районе исследований. Для данных Таманского залива, порта «Кавказ» и лагуны около пос. Приморский средние значения и *sd* не рассчитывались ввиду больших временных интервалов между отборами проб, которые неизбежно привели бы к большим отклонениям этих показателей. При расчете средних значений на этапе ЧМБ характеристики со станций *A* и *H* не учитывались вследствие их максимальной и минимальной солености соответственно.

Основной ионный состав вод Черного моря. Из табл. 2 видно, что соленость и относительное содержание главных ионов в образцах имеют близкие значения, а значения *sd* очень малы, что говорит об относительной однородности вдольбереговой черноморской водной массы в направлении от Севастополя вдоль Керченского пролива до Лазаревского. Максимальное (SS_{\max}) и минимальное (SS_{\min}) значения солености вод Черного моря в ходе экспедиции 2022 г. были зафиксированы на этапе ЧМБ: $SS_{\max} = 19,0$ около Анапы, $SS_{\min} = 17,7$ около Новороссийска. Пониженному значению солености вод в Новороссийской бухте способствовало, вероятно, распреснение морских вод стоком р. Цемес, поступающим в бухту с северо-западного направления.

В среднем *AT* составила 2,90 ммоль/кг ($AT_{\max} = 3,08$ ммоль/кг, $AT_{\min} = 2,85$ ммоль/кг). В Черном море *AT* представлена в основном карбонатной щелочностью, а доля ионов боратной, фосфатной, кремниевой и другой щелочности незначительна [1]. В прибрежной зоне Черного моря (этап ЧМБ) *AT* была в среднем на 9% выше, чем в открытом море (этап ЧМА).

Значения концентраций главных ионов в пробах воды, отобранных с судна в ходе этапа ЧМА и полученных с берега в ходе этапа ЧМБ, были очень близкими (табл. 2).

Результаты исследования ионного состава и солености поверхностных вод северо-восточной части Черного моря позволили установить, что они имеют вполне определенный ОИС, при котором $SS = 18,66$ (что соответствует $SP = 18,10$), $S_{Cl} = 18,29$ ($sd_{SS}, SP, S_{Cl} = 0,3$), $SA = 18,44$ ($sd_{SA} = 0,4$), а относительное содержание главных ионов (в %) следующее:

$$\begin{aligned} Cl^- &= 54,05 \ (sd = 0,3), \\ SO_4^{2-} &= 8,16 \ (sd = 0,3), \\ HCO_3^- &= 1 \ (sd = 0,3), \\ Na^+ &= 30,84 \ (sd = 0,4), \\ K^+ &= 1,29 \ (sd = 0,1), \\ Ca^{2+} &= 1,30 \ (sd = 0,1), \\ Mg^{2+} &= 3,30 \ (sd = 0,2). \end{aligned}$$

Сульфат-хлорное соотношение для поверхностных вод Черного моря (по данным этапов ЧМА и ЧМБ) составило в среднем 0,1492 ($sd = 0,004$).

Основной ионный состав вод Таманского залива. Данные табл. 2 демонстрируют существенные сезонные колебания солености вод Таманского залива и лагуны, примыкающей к нему. Например, пробы, полученные около

пос. Приморский (ст. *II*) Таманского залива, имели в апреле соленость 22,12, в июле 18,64, в ноябре 16,13. Менее существенные колебания солености наблюдались на противоположной стороне Таманского залива, около залива Динской (ст. *Д*) (небольшой залив на северо-западе Таманского п-ова протяженностью 8 км, ширина у выхода 2 км, глубина не превышает 4 м). Этот залив является частью Таманского залива и отделен от Керченского пролива косой Чушка ⁷. В апреле соленость на ст. *Д* составила 18,88, в ноябре 19,50.

Значения *AT* в районе пос. Приморский имели большие сезонные колебания между экстремально высоким значением 6,97 ммоль/кг в апреле (при $pH = 7,44$), более низким 2,87 ммоль/кг в июле ($pH = 8,31$) (соответствует водам Черного моря) и промежуточным значением 4,4 ммоль/кг в ноябре ($pH = 6,68$). На изменение pH поверхностных вод природных водоемов существенно влияет активность фитопланктона, сопровождающаяся процессами окисления органического вещества, фотосинтеза и дыхания, что приводит к изменению содержания угольной кислоты. На повышение pH , как правило, влияет речной сток, обогащенный гидрокарбонатами и кальцием [1]. При снижении среднегодового стока р. Дон и солености вод Азовского моря в последнее время отмечается сохранение высокой интенсивности биологической продуктивности фитопланктона и смена его таксономических групп [12]. Сульфат-хлорное соотношение в водах Таманского залива колебалось в диапазоне 0,1320–0,1727 и в большинстве случаев понижалось с увеличением солености.

На гидрохимические показатели вод Таманского залива влияет водообмен с водами лагуны (ст. *III*), расположенной около пос. Приморский и соединенной с заливом протокой. Ее характеристики приведены в табл. 2. Видно, что лагуна имеет высокую соленость (в июле 39,1, в ноябре 26,63) и состав, отличный от других частей Таманского залива. Хлоридов и ионов магния в лагуне было больше, а гидрокарбонатов и ионов натрия меньше, чем в других пробах залива. В целом воды лагуны представляли собой трансформированные, вероятно, при испарении и биологических процессах, воды Таманского залива. Относительное содержание хлоридов здесь было самым низким, а сульфатов – самым высоким из всех районов залива. Сульфат-хлорное соотношение составило 0,1728 при $SS = 39,61$ в июле и 0,1608 при $SS = 26,63$ в ноябре.

Анализируя полученные результаты, можно предположить, что воды Керченского пролива, поступаая в Таманский залив при определенных условиях (напр., под действием юго-западного ветра), заполняют залив и прилегающую к нему лагуну. Вследствие недостаточной горизонтальной циркуляции и мелководья Таманского залива керченские воды, попадая в лагуну, задерживаются здесь, частично испаряются и подвергаются биологическим процессам, меняя свой состав. Под действием северо-восточного ветра (и/или других условий) эти воды с повышенной в результате испарения соленостью и трансформированным составом поступают обратно в Керченский пролив вместе с менее солеными водами из центральной части Азовского моря. Таким образом, Таманский залив играет важную роль в солевом балансе вод Керченского пролива.

Керченский пролив. Согласно табл. 2, значения солености и относительного содержания главных ионов в образцах вод Керченского пролива (без учета вод Таманского залива) в сентябре 2019 и 2022 гг., июле 2020 г. и декабре

2021 г. очень близки, что демонстрирует однородность вод, но при этом эти значения имеют существенные сезонные различия. Наиболее низкие значения солености наблюдались в мае 2019 г., ноябре (ст. *ПК*) и декабре 2021 г. и составляли 15,25, 13,80 и 16,22 соответственно. Пониженная соленость в эти месяцы по сравнению с другими сезонами связана с затоком в пролив как менее соленых (~ 14) вод Азовского моря, чему способствует северо-восточный ветер [22, 32], так и соленых вод Таманского залива. Основной состав вод в Керченском проливе при пониженной солености отличался от состава черноморских вод (этапы ЧМА и ЧМБ) меньшим содержанием хлоридов и большим – сульфатов, характерным для вод центральной части Азовского моря. Наибольшие соленость (18,01–19,04) и *АТ* наблюдались в сентябре 2019 и 2022 гг. Высокая соленость и характер ОИС в это время года свидетельствуют о распространении в проливе вод Черного моря и об отсутствии затока азовоморских вод. Максимум толщины слоя испарения с поверхности Азовского моря в районе Керченского пролива наблюдается в конце лета и осенью в результате поступления через пролив более теплых черноморских вод, повышающих температуру азовоморских вод [1]. Отметим близкое относительное содержание главных компонентов ОИС здесь и в водах Черного моря (этап ЧМА). В июле 2020 г. сумма ионов в водах пролива имела промежуточное между минимальным и максимальным значение и составляла ~ 18,31.

Значения рН в Керченском проливе за весь период наблюдений составляли 8–8,42, что указывает на слабощелочную реакцию водной среды. В водах центральной части Черного моря ранее фиксировались наиболее часто встречаемые значения рН, равные 8,31–8,33 (максимальные 8,45 в апреле – мае, минимальные 8,25 в конце лета и зимой) [1]. В Керченском проливе летом 2008 г., после катастрофы с танкером в 2007 г. [16], значения рН достигали 8,65.

Сравнительный анализ ОИС вод Керченского пролива и прилегающих к нему акваторий. Данные табл. 2 демонстрируют существенные отличия в относительном содержании главных ионов в водах Керченского пролива и прилегающих к нему акваторий. Согласно полученным нами данным и материалам из работы [31], содержание главных ионов в Керченском проливе и в СМВ существенно различается. Во всех исследуемых образцах хлоридов было меньше, чем в СМВ (55,2%): в водах Керченского пролива на 1–2%, в Таманском заливе – до 2%, в водах Черного моря – на ~ 1%. Аналогичные отличия в водах Керченского пролива наблюдались нами и ранее [3]. В большинстве исследованных образцов относительное содержание SO_4^{2-} было в основном выше, чем в СМВ, где оно составляло 7,8% и ниже. Для всех образцов северо-восточной части Черного моря (этапы ЧМА и ЧМБ) содержание SO_4^{2-} было на грани погрешности определения. Для вод Керченского пролива и Таманского залива эти отклонения составляли до 1%. Во всех случаях HCO_3^- содержалось существенно больше, чем в СМВ (0,35%): в водах Керченского пролива, Черного моря (этапы ЧМА и ЧМБ) – в 3 раза, в водах Таманского залива – до 6 раз. Относительное содержание Na^+ в водах Керченского пролива и в СМВ (30,8%) в основном было очень близким, а в некоторых случаях в Керченском проливе и во всех черноморских пробах этапа ЧМА оно было меньше на 0,5%. Только

в мае 2019 г. в Керченском проливе Na^+ было больше на 3%, чем в СМВ. Содержание Na^+ в водах Таманского залива было меньше в среднем на 1%, в водах на этапе ЧМБ – больше на 1%. Относительное содержание K^+ в пробах вод этапов ЧМА и ЧМБ составляло $\sim 1,3\%$, что близко к содержанию в СМВ (1,2%). Концентрация K^+ в Керченском проливе немного отличалась (была меньше на $\sim 0,2\%$) от содержания в СМВ, а в Таманском заливе почти совпадала с СМВ, но иногда превышение составляло до 1% (ст. Д). Содержание Ca^{2+} в исследуемых образцах почти везде было больше, чем в СМВ: в Керченском проливе и Черном море – на $\sim 0,3\%$, в водах Таманского залива – на $\sim 0,6\%$. Содержание Mg^{2+} в пробах Таманского залива и этапа ЧМА было близко к СМВ (3,5%), в Керченском проливе – меньше на 0,2%, в водах этапа ЧМБ – на 0,6%.

На рис. 2 показано распределение относительного содержания компонентов ОИС вод (при соответствующей солености) в исследуемых образцах. Видно, что для вод Черного моря, как прибрежных (синие ромбы), так и удаленных от берега на расстояние ~ 10 км (красные ромбы), относительное содержание главных ионов ОИС в пределах sd имело хорошую сходимость. Это свидетельствует об однородности в целом поверхностной водной массы Черного моря на протяжении ~ 500 км.

Воды Керченского пролива отличаются от вод Черного моря большей неоднородностью и сезонной изменчивостью ОИС (рис. 2). Показано, что при значениях суммы ионов больше или меньше 18,66 ($sd = 0,3$) их относительное содержание меняется. Взаимосвязь наблюдается между содержанием Na^+ и Mg^{2+} как в водах Керченского пролива, так и на этапах ЧМА и ЧМБ, что связано с ионно-обменными процессами на геохимических барьерах при попадании терригенной взвеси с речным стоком в море. В рамках каждого этапа экспедиции содержание Na^+ и Mg^{2+} было близким. В водах Керченского пролива K^+ иногда было немного меньше, чем в водах Черного моря, отклонение его значений составляло $\pm 0,5\%$. Содержание Ca^{2+} в водах Керченского пролива и Черного моря почти совпадало.

Проведенные исследования показали, что SS_{\max} в водах Керченского пролива составляла 19,04 в сентябре 2019 г. В диапазоне солености 15–19, как показывает линия тренда на рис. 2, содержание хлоридов и ионов натрия в составе керченских вод повышается, а сульфатов, магния и кальция – понижается. В относительном содержании калия и гидрокарбонатов прослеживаются колебания, но заметного тренда к изменению не наблюдается. Самая высокая соленость и большая изменчивость состава наблюдалась в Таманском заливе, где происходила метаморфизация керченских вод при их нахождении в прилегающей лагуне. При этом относительное содержание хлоридов, гидрокарбонатов и ионов натрия в составе воды лагуны понижалось, а сульфатов, магния и кальция повышалось. Содержание калия существенно не менялось. Под действием северо-западного ветра, способствующего затоку азовоморских вод в Керченский пролив [32, 33], вероятно, водные массы лагуны смешивались последовательно с водами Таманского залива и Керченского пролива. По этой причине содержание главных ионов вод Керченского пролива имеет большое разнообразие – как сезонное, так и в пределах одной экспедиции (табл. 2, рис. 2).

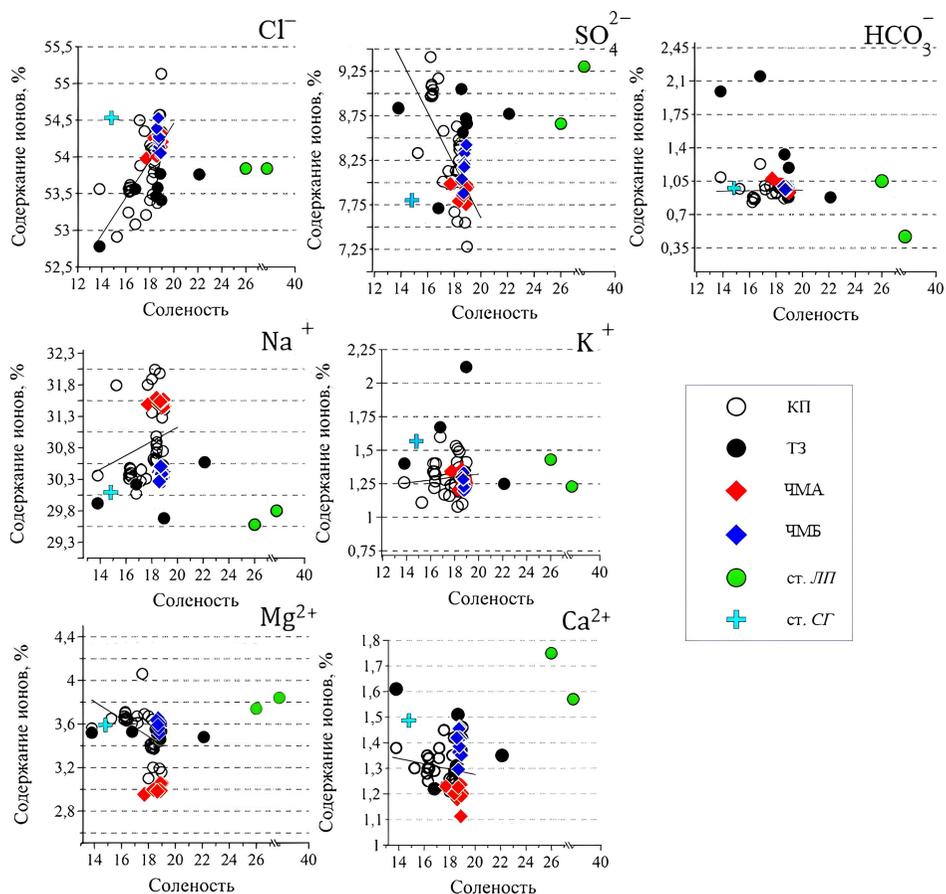
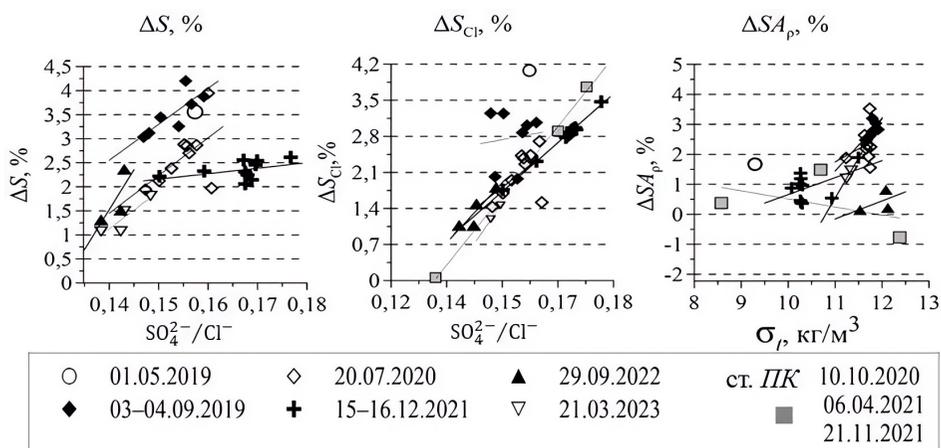


Рис. 2. Относительное содержание компонентов ОИС в водах Керченского пролива (КП), Таманского залива (ТЗ), северо-восточной части Черного моря (этапы ЧМА и ЧМБ), лагуны в Таманском заливе (ст. ЛП) и в водах Темрюкского залива Азовского моря (ст. СТ). Линия тренда показывает, как изменяется содержание элемента при повышении солёности в Керченском проливе

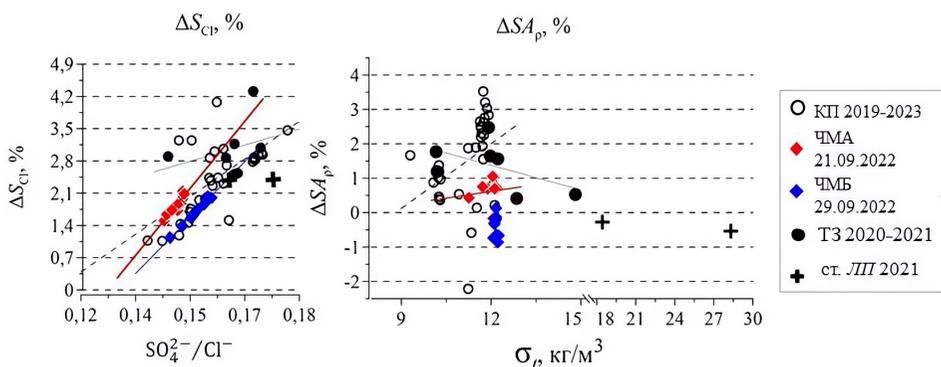
Fig. 2. Relative content of OIS components in the waters of the Kerch Strait (KS), the Taman Bay (TB), the northeastern Black Sea (stages BSA and BSC), lagoon in the Taman Bay (station LP) and in the Temryuk Gulf waters of the Sea of Azov (station GI). The trend line shows how the element content changes with increasing salinity in the Kerch Strait

Анализ взаимосвязи ОИС и солёности всех исследованных образцов позволяет отличить воды Черного моря в Керченском проливе от трансформированных вод Азовского моря и Таманского залива и обнаружить, что при одинаковой солёности воды Керченского пролива могут иметь разное соотношение главных ионов.

Влияние ОИС на точность определения солёности вод Керченского пролива и прилегающих акваторий. Отличие ионного состава вод Черного, Азовского морей и Керченского пролива от вод Мирового океана приводит к ошибкам при измерении солёности и плотности гидрофизическим оборудованием и другими способами [1, 3, 4, 31]. Результаты исследования влияния вариаций ионного состава на точность определения солёности в поверхностных водах Керченского пролива, Черного моря, а также Таманского залива показаны на рис. 3.



a



b

Р и с. 3. ΔS , ΔS_{Cl} , ΔSA_{ρ} и их взаимосвязь с ионным составом и плотностью в водах Керченского пролива (КП) (отдельно по 5 экспедициям) – *a*; в водах Керченского пролива (5 экспедиций вместе), а также Черного моря (этапы ЧМА и ЧМБ), Таманского залива (ТЗ) и лагуны (ст. ЛП) – *b*
Fig. 3. ΔS , ΔS_{Cl} , ΔSA_{ρ} and their relationship with the ionic composition and density in the Kerch Strait (KS) waters (separately for 5 expeditions) – *a*; in the waters of the Kerch Strait (5 expeditions together), as well as the Black Sea (stages BSA and BSC), the Taman Bay (TB) and the lagoon (station LP) – *b*

Наибольшие отклонения наблюдались между значениями SS и SP (ΔS), наименьшие – между SS и SA_{ρ} (ΔSA_{ρ}). Видно, что ΔS и ΔS_{Cl} зависят от ионного состава и увеличиваются с повышением SO_4^{2-}/Cl^{-} , а ΔSA_{ρ} зависит от плотности и солености воды и увеличивается с их повышением. Эти процессы наблюдаются как в Керченском проливе, так и в Таманском заливе. Заметно, что ΔSA_{ρ} во всех пробах в основном повышается до 12 кг/м^3 (при температуре $20\text{--}21^{\circ}\text{C}$ до солености ~ 19), а далее при повышении плотности, как видно на примере вод на ст. ЛП, ΔSA_{ρ} снижается под влиянием существенно измененного состава.

В Керченском проливе ΔS составила $1\text{--}4\%$, в среднем $2,5\%$ ($SS = 0,5$), т. е. сумма ионов была больше в среднем на $2,5\%$, чем SP . В Таманском заливе и Черном море измерения CTD -зондом не проводились, поэтому ΔS не рассчитывалась.

В Керченском проливе ΔS_{Cl} составила 1–3%, в среднем 2,3% ($SS = 0,4$), т. е. соленость, рассчитанная по хлорности, была меньше, чем сумма ионов, в среднем на 2,3%. В Таманском заливе S_{Cl} была меньше на 0–3%, а в Черном море – в среднем на 1,8% ($SS = 0,3$), чем SS .

Расчет ΔS_{Ar} показал, что S_{Ar} в основном была меньше, чем сумма ионов, но в некоторых пробах с $SS > 18,66$ (т. е. больше средней солености черноморских вод, а следовательно, и с отличным ионным составом) она была больше. Так, в Керченском проливе S_{Ar} в основном была меньше SS на 2–3%, но на ст. *ПК* в октябре 2020 г. (при высоком значении $SS = 18,96$) она была больше на 0,8%. Значение S_{Ar} в Таманском заливе было ниже SS на 0,4–2,5%, но в лагуне (при повышенной SS), наоборот, значение S_{Ar} выше в среднем на 0,4%. В Черном море в образцах воды этапа ЧМА S_{Ar} была на 0,1–0,8% меньше, чем сумма ионов, а в образцах воды этапа ЧМБ – на ~ 1% больше, т. е. ΔS_{Ar} для вод Черного моря составила в среднем $\pm 0,1$ г/кг, и, таким образом, разница между ΔS_{Ar} и SS была несущественной. Из вышесказанного следует, что расчет по *TEOS-10* для вод Черного моря показывает наиболее близкий (~ 1%) к сумме ионов результат при условии соответствия солености и соотношения ионов составу вод Черного моря.

Гидрохимические аномалии ОИС влияют на точность расчета солености по электропроводности, измеренной *CTD*-зондом, что приводит к существенным ошибкам (до 3%) [3]. Несмотря на то что в черноморских водах этапов ЧМА и ЧМБ в 2022 г. *CTD*-зондирования не проводились, некоторые пробы из Керченского пролива с суммой ионов, равной ~ 18,8, имеют аналогичный с черноморскими водами ионный состав, а значит, ΔS , составляющая ~ 2,5%, может быть характерна и для этих вод. Вследствие зависимости ΔS_{Cl} от вариаций солевого состава при определении солености с использованием хлорного коэффициента необходимо учитывать поправку ΔS_{Cl} , равную ~ 2%, для поверхностных вод Черного моря и Керченского пролива.

Значение S_{Ar} имеет наименьшее отклонение от суммы ионов практически во всех исследованных образцах. Расчет солености по уравнению *TEOS-10* проще, чем расчет по сумме ионов, но требует лабораторных условий и наличия специального оборудования (высокоточного плотномера), поэтому этот способ нельзя назвать альтернативой *CTD*-исследованиям, но можно использовать для уточнения полученных *SP*-данных.

Выводы

В ходе работы были получены новые гидрохимические данные о водах Керченского пролива и прилегающих к нему акваторий северо-восточной части Черного моря, Таманского залива и Азовского моря, которые существенно расширяют представление о водообмене через Керченский пролив.

Было установлено, что исследованные черноморские воды, в том числе перемещающиеся через пролив, имеют вполне определенное содержание главных ионов в ОИС: $Cl^- = 54,2\%$, $SO_4^{2-} = 7,9\%$, $HCO_3^- = 1\%$, $Na^+ = 30,8\%$, $K^+ = 1,3\%$, $Ca^{2+} = 1,3\%$ и $Mg^{2+} = 3,3–3,6\%$. Этим водам соответствует сумма ионов, равная 18,66 ($sd = 0,3$, что составляет 1,5%). Эти черноморские воды отличаются от вод Таманского залива различным соотношением главных ионов ОИС даже при одинаковой солености.

Водам Таманского залива свойственна более высокая соленость, а ионно-солевой состав формируется водообменом между Черным морем, центральной частью Азовского моря и лагуной, где происходит трансформация вод. Установлено, что воды лагуны в Таманском заливе имели соленость 39 в июле и 26 в ноябре и содержали Cl^- и Na^+ в среднем меньше на 0,2 и 0,5%, чем воды Черного моря. В водах лагуны SO_4^{2-} было больше на 1%, а Ca^{2+} и Mg^{2+} – на 0,4%, чем в водах Черного моря. Таманский залив играет важную роль в солевом балансе вод Керченского пролива, поставляя трансформированные воды Азовского и Черного морей повышенной солености (до 19), рассчитанной суммой ионов. Процессами водообмена с соленой лагуной отчасти объясняется большая изменчивость состава вод в Таманском заливе и Керченском проливе.

При сравнении вод исследуемых акваторий и СМВ обнаружено, что ОИС Керченского пролива и прилегающих акваторий отличался от океанского повышенным в среднем до 1% содержанием сульфатов, в 3–6 раз – гидрокарбонатов и пониженным в среднем до 2% содержанием хлоридов. Эти отличия проявлялись тем ярче, чем большая доля в образце принадлежала пресноводному материковому стоку или трансформированным водам Таманского залива, где, например, сульфат-хлорное соотношение было выше, чем в Черном море и Керченском проливе. Ионные вариации способствовали занижению значений солености при ее расчете по данным *CTD*-зондирования во всех исследуемых водах. Для образцов Керченского пролива, и, вероятно, Черного моря это занижение составило в среднем 2,5%, что соответствует сумме ионов $\sim 0,5$. При расчете солености с использованием хлорного коэффициента обнаружены отклонения: в Керченском проливе они составляют $\sim 2,3\%$, в Таманском заливе $\sim 2\%$, в Черном море $\sim 2,5\%$.

Выполненные исследования показали, что воды Керченского пролива различного происхождения даже при одинаковых значениях солености могут различаться по содержанию компонентов основного ионно-солевого состава.

В океанологической практике необходимо учитывать ошибки при определении солености, связанные с вариациями ионно-солевого состава в водах Черного и Азовского морей и их акваторий, особенно выраженными в районах, подверженных влиянию материкового стока и водообмена с другими водоемами.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Гидрометеорология и гидрохимия морей СССР. Том 4 : Черное море. Вып. 2 : Гидрохимические условия и океанологические основы формирования биологической продуктивности. Санкт-Петербург : Гидрометеиздат, 1992. 220 с.
2. Комплексные экосистемные исследования в российской части Азовского моря (18–25 июля 2006 г.) / Ю. А. Федоров [и др.] // *Океанология*. 2007. Т. 47, № 2. С. 316–319.
3. Андрулионис Н. Ю., Завьялов П. О., Ижицкий А. С. Влияние вариаций ионно-солевого состава вод на точность измерений солености // *Морской гидрофизический журнал*. 2022. Т. 38, № 5. С. 481–498. EDN JMZYUQ. doi:10.22449/0233-7584-2022-5-481-498
4. Гидрометеорология и гидрохимия морей СССР. Т. 5 : Азовское море. Санкт-Петербург : Гидрометеиздат, 1991. 235 с.
5. Изотопы серы в верхней части анаэробной зоны Черного моря / А. В. Дубинин [и др.] // *Океанология*. 2017. Т. 57, № 6. С. 885–893. EDN ZVRIAX. doi:10.7868/S0030157417060041

6. *Kremling K.* Relation Between Chlorinity and Conductometric Salinity in Black Sea Water // *The Black Sea – Geology, Chemistry, and Biology* / E. T. Degens, D. A. Ross. American Association of Petroleum Geologists, 1974. P. 151–154. <https://doi.org/10.1306/M20377C44>
7. *Коновалов С. К., Рябинин А. И.* Водородный показатель (рН) вод Черного моря // *Метеорология и гидрология*. 1987. № 10. С. 75–81.
8. *Маккавеев П. Н., Бубнов П. В.* Особенности вертикального распределения компонентов карбонатной системы в аэробной зоне Черного моря // *Океанология*. 1993. Т. 33, № 3. С. 354–359.
9. *Makkaveev P. N., Nalbandov Yu. R., Vlasova E. S.* The Distribution of Dissolved Inorganic Carbon in the Zone of Contact of Aerobic and Anaerobic Waters of the Black Sea // *Oceanology*. 2005. Vol. 45, Suppl. 1. P. S85–S92.
10. *Hiscock W. T., Millero F. J.* Alkalinity of the anoxic waters in the Western Black Sea // *Deep Sea Research Part II: Topical Studies in Oceanography*. 2006. Vol. 53, iss. 17–19. P. 1787–1801. doi:10.1016/j.dsr2.2006.05.020
11. *Хоружий Д. С., Овсяный Е. И., Коновалов С. К.* Сопоставление результатов определения карбонатной системы и общей щелочности морской воды по данным различных аналитических методов // *Морской гидрофизический журнал*. 2011. № 3. С. 33–47. EDN TOESBD.
12. *Косенко Ю. В., Барабашин Т. О., Баскакова Т. Е.* Динамика гидрохимических характеристик Азовского моря в современный период осолонения // *Известия высших учебных заведений. Северо-Кавказский регион. Естественные науки*. 2017. № 3–1. С. 76–82. EDN ZOKXLB. doi:10.23683/0321-3005-2017-3-1-76-82
13. *Dashkevich L. V., Berdnikov S. V., Kulygin V. V.* Many-year variations of the average salinity of the Sea of Azov // *Water Resources*. 2017. Vol. 44, iss. 5. P. 749–757. doi:10.1134/S0097807817040042
14. Результаты морских научных исследований Южного научного центра Российской академии наук (ЮНЦ РАН) в Азовском море в 2003–2018 гг. Часть 1 : Гидрология и гидрохимия / С. В. Бердников [и др.] // *Водные биоресурсы и среда обитания*. 2019. Т. 2, № 3. С. 7–19. EDN JTAFFX.
15. *Решетняк О. С., Комаров Р. С.* Межгодовая и сезонная изменчивость стока растворенных веществ в дельтовых рукавах реки Кубани // *Вестник Московского университета. Серия 5. География*. 2023. Т. 78, № 1. С. 95–105. EDN QHCCPB. doi:10.55959/MSU0579-9414-5-2023-1-95-105
16. Комплексные экологические исследования Керченского пролива и Таманского залива после катастрофы танкера с мазутом (2007–2010 гг.) / В. В. Сапожников [и др.] // *Труды ВНИРО*. 2013. Т. 150. С. 65–77. EDN TFSJPD.
17. Климатические изменения гидрометеорологических параметров Черного и Азовского морей (1980–2020 гг.) / А. И. Гинзбург [и др.] // *Океанология*. 2021. Т. 61, № 6. С. 900–912. EDN XNMVYL. doi:10.31857/S003015742106006X
18. *Демченко В. А.* Особенности влияния изменяющегося климата на сообщества рыб Азовского бассейна // *Вестник Запорожского национального университета. Биологические науки*. 2010. № 1. С. 22–32.
19. Оценка загрязнения Керченского пролива и прилегающей акватории Черного моря по данным натурных измерений 2019–2020 гг. / П. О. Завьялов [и др.] // *Океанология*. 2022. Т. 62, № 2. С. 194–203. EDN YHPENI. doi:10.31857/S0030157422020174
20. *Radulescu V.* Environmental Conditions and the Fish Stocks Situation in the Black Sea, between Climate Change, War, and Pollution // *Water*. 2023. Vol. 15, iss. 6. 1012. <https://doi.org/10.3390/w15061012>
21. Гидрометеорологические условия морей Украины. Т. 1 : Азовское море / Ю. П. Ильин [и др.]. Севастополь, 2009. 400 с.
22. *Иванов В. А., Белокопытов В. Н.* Океанография Черного моря. Севастополь, 2011. 212 с.

23. Study of Water Exchange in the Kerch Strait Based on Historical Data and Contact Measurements in 2019 / I. V. Zavalov [et al.] // *Oceanology*. 2021. Vol. 61, iss. 3. P. 329–337. doi:10.1134/S0001437021030176
24. Матишов Г. Г., Дашкевич Л. В., Кириллова Е. Э. Цикличность климата в Приазовье: голоцен и современный период (XIX–XXI вв.) // Доклады Российской академии наук. Науки о Земле. 2021. Т. 498, № 1. С. 96–100. EDN VHUREG. <https://doi.org/10.31857/S2686739721050091>
25. Бердников С. В., Дашкевич Л. В., Кулыгин В. В. Новое состояние гидрологического режима Азовского моря в XXI веке // Доклады Российской академии наук. Науки о Земле. 2022. Т. 503, № 1. С. 65–70. EDN REQVQV. doi:10.31857/S2686739722030057
26. Коновалов С. К., Видничук А. В., Орехова Н. А. Пространственно-временные характеристики гидрохимической структуры вод глубоководной части Черного моря // Система Черного моря. М. : Научный мир, 2018. С. 106–118.
27. Кондратьев С. И., Романов А. С., Внуков Ю. Л. Особенности распределения гидрохимических характеристик в районе материкового склона северо-западной части Черного моря // *Морской гидрофизический журнал*. 2007. № 5. С. 69–79. EDN YOWSAP.
28. *Millero F. J. History of the Equation of State of Seawater // Oceanography*. 2010. Vol. 23, iss. 3. P. 18–33. <https://doi.org/10.5670/oceanog.2010.21>
29. *Pawlowicz R. Key Physical Variables in the Ocean: Temperature, Salinity, and Density // Nature Education Knowledge*. 2013. Vol. 4, iss. 4. 13.
30. Андрулионис Н. Ю., Завьялов П. О. Лабораторные исследования основного компонентного состава гипергалинных озер // *Морской гидрофизический журнал*. 2019. Т. 35, № 1. С. 16–36. EDN PXDBFT. doi:10.22449/0233-7584-2019-1-16-36
31. The composition of Standard Seawater and the definition of the Reference-Composition Salinity Scale / F. J. Millero [et al.] // *Deep Sea Research. Part I: Oceanographic Research Papers*. 2008. Vol. 55, iss. 1. P. 50–72. doi:10.1016/j.dsr.2007.10.001
32. Water exchange between the Sea of Azov and the Black Sea through the Kerch Strait / I. Zavalov [et al.] // *Ocean Science*. 2020. Vol. 16, iss. 1. P. 15–30. <https://doi.org/10.5194/os-16-15-2020>
33. Zavalov P. O., Izhitskiy A. S., Sedakov R. O. Sea of Azov waters in the Black Sea: Do they enhance wind-driven flows on the shelf? // *The Ocean in Motion: Circulation, waves, polar oceanography* / Eds. M. G. Velarde, R. Yu. Tarakanov, A. V. Marchenko. Cham : Springer, 2018. P. 461–474. (Springer Oceanography). doi:10.1007/978-3-319-71934-4_28

Об авторах:

Андрулионис Наталья Юрьевна, научный сотрудник, Лаборатория взаимодействия океана с водами суши и антропогенных процессов, Институт океанологии им. П. П. Ширшова РАН (117997, Российская Федерация, г. Москва, Нахимовский проспект, д. 36), кандидат географических наук, **SPIN-код: 9040-2714**, **ORCID ID: 0000-0001-9141-1945**, **Web of Science ResearcherID: AGP-4038-2022**, **Scopus Author ID: 57209575290**, natalya@ocean.ru

Завьялов Иван Борисович, младший научный сотрудник, Лаборатория взаимодействия океана с водами суши и антропогенных процессов, Институт океанологии им. П. П. Ширшова РАН (117997, Российская Федерация, г. Москва, Нахимовский проспект, д. 36), **ORCID ID: 0009-0004-0083-4475**, **Web of Science ResearcherID: AGQ-4773-2022**, i.zav@ocean.ru

Рождественский Сергей Александрович, ведущий инженер, Лаборатория взаимодействия океана с водами суши и антропогенных процессов, Институт океанологии им. П. П. Ширшова РАН (117997, Российская Федерация, г. Москва, Нахимовский проспект, д. 36), **ORCID ID: 0000-0003-4654-9130**, sergeir92@list.ru