


Основной ионный состав прибрежных вод северо-восточной части Черного моря

Н. Ю. Андрулионис , И. Б. Завьялов, П. О. Завьялов

Институт океанологии им. П. П. Ширшова РАН, Москва, Россия
 natalya@ocean.ru

Поступила в редакцию 09.10.2025; одобрена после рецензирования 22.10.2025;
принята к публикации 16.03.2026.

Аннотация

Цель. Цель работы – исследовать изменчивость основного ионного состава и солёности в прибрежной зоне северо-восточной части Черного моря с 2022 по 2025 г., проанализировать ее причины, а также оценить влияние основного ионного состава на точность определения солёности классическим (по хлорности) и современным (*TEOS-10*) методами.

Методы и результаты. Пробы отобраны в экспедициях в сентябре 2022 г., июне, сентябре и декабре 2023 г., августе 2024 г., марте и августе 2025 г. от г. Анапы до пос. Лазаревское (Сочи). Концентрации главных ионов (Cl^- , SO_4^{2-} , HCO_3^- , Ca^{2+} , Mg^{2+}) определены методом потенциометрического титрования, K^+ – гравиметрически, а Na^+ – методом расчета. Солёность вод рассчитана тремя способами: суммой главных ионов (*SS*), по хлорности (*ScI*) и по плотности с использованием термодинамического уравнения *TEOS-10* (*SA_p*). Плотность измерена высокоточным лабораторным плотномером. Солёность исследуемых образцов воды варьировала от 8,77 до 19,11 г/кг (средняя ~ 18,40 г/кг). Относительное содержание Cl^- изменялось в диапазоне 52,6–54,6 %, SO_4^{2-} – 7,8–12,9 %, HCO_3^- – 0,8–1,4 %, Na^+ – 29,9–31,5 %, Ca^{2+} – 1,1–1,8 %, Mg^{2+} – 3–3,7 %. Наибольшие отклонения основного ионного состава от океанического соответствуют водам пониженной солёности, что указывает на определяющую роль в модификации ОИС пресноводного материкового стока. Отклонение расчета солёности по хлорности от суммы ионов достигало в прибрежных морских водах с солёностью 19 г/кг 5 % (~ 0,9 г/кг), непосредственно в устье реки в водах с солёностью 9 г/кг – 11 % (~ 0,9 г/кг), а с использованием уравнения *TEOS-10* по плотности отклонение составило в прибрежных морских водах с солёностью 19 г/кг 4 %, или 0,7 г/кг. Установлена корреляция между ростом разности *SS* – *ScI* и повышением содержания SO_4^{2-} , HCO_3^- и Ca^{2+} в составе вод; при оценке разности *SS* – *SA_p* такой корреляции не наблюдалось.

Выводы. Сравнение трех методов определения солёности – по сумме ионов (*SS*), с помощью хлорного коэффициента (*ScI*) и с использованием значений плотности *SA_p* – показало, что наиболее точные значения получены по сумме ионов. Этот способ позволяет также установить причины изменения солёности из-за сезонных вариаций содержания некоторых ионов (SO_4^{2-} , HCO_3^- и Ca^{2+}) в прибрежных акваториях. Сравнительный анализ результатов показал тенденцию к росту солёности в прибрежных водах северо-восточного шельфа за период наблюдения 2022–2025 гг.

Ключевые слова: северо-восточный шельф Черного моря, Краснодарский край, ионный состав, солёность морской воды, плотность морской воды, Черное море

Благодарности: исследования выполнены в рамках государственного задания ИО РАН FMWE 2024-0015. Авторы выражают благодарность всем участникам экспедиций 2022–2025 гг., в которых были получены использованные в статье данные.

Для цитирования: Андрулионис Н. Ю., Завьялов И. Б., Завьялов П. О. Основной ионный состав прибрежных вод северо-восточной части Черного моря // Морской гидрофизический журнал. 2026. Т. 42, № 3. С. 402–421. EDN FMVRZW.

Major Ionic Composition of Coastal Waters of the Northeastern Black Sea

N. Yu. Andrulionis , I. B. Zavalov, P. O. Zavalov

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

Abstract

Purpose. The purpose of the work is to study the variability of major ionic composition and salinity in the coastal zone the northeastern Black Sea over the period 2022–2025, to analyze its causes, as well as to assess the impact of major ionic composition on the accuracy of salinity determination by the classical (chlorinity) and modern (*TEOS-10*) methods.

Methods and Results. The water samples were collected in the coastal water area from the city of Anapa to the Lazarevskoye settlement (Sochi) during the expeditions in September 2022, in June, September and December, 2023, in August 2024, and in March and August, 2025. The concentrations of major ions (Cl^- , SO_4^{2-} , HCO_3^- , Ca^{2+} , Mg^{2+}) were determined by the potentiometric titration method, K^+ – gravimetrically, and Na^+ – by the calculation method. The water salinity values were calculated in three ways: by the sum of major ions (*SS*), by chlorinity (*S_{Cl}*), and by density using the *TEOS-10* thermodynamic equation (*S_{Aρ}*). Density was measured by a high-precision laboratory densitometer. Salinity of the studied water samples varied from 8.77 to 19.11 g/kg (average is ~ 18.40 g/kg). The relative content of Cl^- varied within the range 52.6–54.6 %, SO_4^{2-} – 7.8–12.9 %, HCO_3^- – 0.8–1.4 %, Na^+ – 29.9–31.5 %, Ca^{2+} – 1.1–1.8 %, and Mg^{2+} – 3–3.7 %. The highest deviations of major ionic composition from the oceanic one correspond mainly to the low salinity waters, and this fact indicates the decisive role of freshwater continental runoff in the modification of major ionic composition. The deviation of chlorinity-based salinity calculation from the one based on sum of ions were up to 5% (~ 0.9 g/kg) in the coastal sea waters with salinity 19 g/kg, and 11% (~ 0.9 g/kg) directly in the river mouth waters with salinity 9 g/kg, and the deviation of density-based salinity calculation using the *TEOS-10* equation constituted 4% (0.7 g/kg) in the coastal sea waters with salinity 19 g/kg. A correlation between the increase in *SS* – *S_{Cl}* difference and the increase in SO_4^{2-} , HCO_3^- и Ca^{2+} contents in water composition was established; when assessing the *SS* – *S_{Aρ}* difference, no such correlation was observed.

Conclusions. A comparison of three methods for determining salinity – by the sum of ions (*SS*), by the chlorine coefficient (*S_{Cl}*), and using the *S_{Aρ}* density values – has shown that the most accurate values are obtained by the ion sum method. This method makes it possible to define the causes of salinity change due to seasonal variations in the concentrations of certain ions (SO_4^{2-} , HCO_3^- , and Ca^{2+}) in the coastal waters. A comparative analysis of the results revealed a trend towards increasing salinity in the coastal waters of the Black Sea northeastern shelf over the observation period 2022–2025.

Keywords: northeastern shelf of the Black Sea, Krasnodar Krai, ion composition, seawater salinity, seawater density, Black Sea

Acknowledgments: The research was carried out within the framework of state assignment of IO RAS FMWE 2024-0015. The authors are grateful to all the participants of expeditions in 2022–2025 during which the data used in the study were obtained.

For citation: Andrulionis, N. Yu., Zavalov, I. B. and Zavalov, P. O., 2026. Major Ionic Composition of Coastal Waters of the Northeastern Black Sea. *Physical Oceanography*, 33(3), pp. 439-457.

Введение

Основной ионный состав (ОИС) вод Черного моря формируется теми же компонентами, что и состав всех морей и океанов на Земле, а именно Cl^- , SO_4^{2-} , HCO_3^- , Na^+ , K^+ , Ca^{2+} и Mg^{2+} . Однако для черноморских вод характерно отличие

относительного содержания (массовой доли) некоторых компонентов от их содержания в океанической воде [1]. Эталонном океанической воды служит стандартная морская вода (СМВ) *IAPSO*, предназначенная для калибровки приборов и верификации измерений солёности [2]. Аномалии ОИС относительно состава этой воды приводят к ошибкам при определении физических параметров способами, разработанными для океанической воды [1, 3, 4].

Аномалии ОИС черноморских вод являются следствием особенностей их формирования. Черное море, с одной стороны, представляет собой внутреннее море бассейна Атлантического океана, а с другой – крупнейший в мире меромиктический водоем глубиной до 2212 м [5]. Его гидрографический режим характеризуется слабосолеными поверхностными водами, смешанными с речным стоком, и более солеными глубинными водами, поступающими из Средиземного моря. Начиная с глубины ~ 150–170 м, море заполнено бескислородными водами, содержащими сероводород, объем которых составляет почти 80 % объема всех вод моря [6]. Практическая солёность поверхностных вод в центральной части Черного моря обычно составляет 17,85–18,40 ЕПС (единиц практической солёности), а на северо-западном шельфе – 14–16 ЕПС (хотя встречаются и более высокие значения, до 17,90 ЕПС) [7, 8].

В северо-восточной части моря поступающие в море речные воды образуют прилегающие к устьям рек мезомасштабные структуры (плюмы), которые выделяются пониженной солёностью, а также температурой, отличной от температуры окружающей воды. Их воды, как правило, содержат много взвеси, растворенной органики и биогенных веществ [9]. Речной сток, попадая в море, изменяет химический состав его вод [10]. Область впадения в море речных вод, называемая иногда областью маргинального фильтра, представляет собой «ловушку» для осадочного материала природного и антропогенного происхождения [11]. На ее границе происходит метаморфизация ионного состава вод. В результате состав черноморской воды отличается от состава вод Мирового океана повышенным относительным содержанием карбонат-иона и большей щелочностью [5], а также повышенным содержанием сульфат-иона [1]. Ионные аномалии в акваториях Черного моря могут составлять: для сульфатов до 1 %, ионов кальция до 30 %, а для гидрокарбонатов – до 300–600 % (завышение в 3–6 раз) [12].

В Черное море впадает около 1000 больших и малых рек. Суммарный годовой объем речного стока составляет ~ 350 км³, что превышает поступление воды с атмосферными осадками (238 км³ в год) и приближается к величине испарения (396 км³ в год) [13]. Водосборный бассейн десяти крупных рек, таких как Дунай, Днепр, Риони, Днестр и др., превышает 10 000 км² и составляет 80 % от общего объема [14]. На долю малых и средних рек приходится от 40 до 120 км³ годового объема стока [9]. В северо-восточной части РФ в море впадают крупные реки Шахе и Мзымта, несколько средних рек (Пшава, Вулан, Туапсе, Псеуапсе, Сочи) и более 20 малых рек. Общий среднемноголетний объем стока в Черное море с территории России составляет около 7 км³ в год [15]. Хотя вклад этих рек в водный баланс моря в целом относительно невелик, он влияет на систему суша – море в региональных масштабах. От него зависит биопродуктивность российского черноморского шельфа, качество вод, а также уровень терригенного и антропогенного загрязнения [9].

Минерализация большинства черноморских рек (особенно крупных рек северо-восточной части моря) существенно выше среднеглобальной и колеблется в пределах 150–600 мг/л. Их воды протекают по густонаселенным регионам с развитой промышленностью и сельским хозяйством. Концентрации почти всех компонентов ОИС в этих реках в 3–5 раз превышают глобальный уровень [11]. Быстрый рост приморских городов и курортных объектов, а также сельскохозяйственная деятельность на побережье приводят к усилению негативного воздействия на водные экосистемы. Малые реки северо-восточного шельфа Черного моря, наряду с ливневыми стоками и сточными коллекторами бытовых вод, являются основными источниками поступления большей части загрязняющих веществ в морскую среду. Это особенно актуально вблизи больших городов – Анапы, Новороссийска, Геленджика, Туапсе и Сочи [16].

Физические характеристики морской воды, такие как соленость и плотность, имеют фундаментальное значение в океанографии. Они необходимы для определения качества морской воды, мониторинга ее биогеохимических параметров, исследования термохалинной циркуляции вод и моделирования динамики водных масс. Точность определения физических параметров особенно важна при разработке гидрофизического оборудования [17, 18]. Для решения этой задачи было разработано международное термодинамическое уравнение морской воды *TEOS-10 (Thermodynamic Equation Of Seawater – 2010)*. Оно учитывает изменения относительного содержания неорганических растворенных компонентов в океане, вызванные небольшими ионными вариациями. Однако внутренние моря подвержены влиянию биогеохимических процессов, а сложные пространственно-временные изменения ОИС в них изучены недостаточно. Возможность применения в таких водоемах современных способов расчета физических параметров требует уточнения.

Известно, что для открытого океана абсолютное отклонение солености может составлять до 0,03 г/кг, а в некоторых его прибрежных районах – до 0,1 г/кг [19]. Во внутренних морях, акваториях и эстуариях, где влияние речных солей и твердых веществ речного стока приводит к изменению химического состава вод, это отклонение может быть гораздо больше [10, 20]. При этом каждое море имеет свои особенности, и роль разных источников поставки осадочного материала (речной сток, эоловый материал, абразия берегов, ледовый сток и другие) может существенно различаться в разных морях [11]. Каждый основной ион, поступающий с речным стоком, следует рассматривать индивидуально, поскольку его источники, поглотители и регуляторы, как естественные, так и антропогенные, различны [21].

Поступившие с речным стоком компоненты ОИС активно перераспределяются вдоль побережья под воздействием гидродинамических процессов. Северо-Восточно-Кавказское течение, являясь северо-восточной частью основного циклонического течения Черного моря, иногда подходит очень близко к узкому шельфу, что обуславливает возникновение топографически генерируемых циклонических вихрей. Эти вихри способствуют интенсивному переносу захваченной воды вдоль и поперек шельфа, усиливая эффект самоочищения прибрежной зоны [22], а также переносу компонентов ОИС.

Изучение ОИС расширяет представление о динамике прибрежных вод и их взаимодействии с окружающей средой. Его необходимо учитывать при

расчете физических свойств и оценке качества воды, а также для контроля и предотвращения негативных последствий изменения окружающей среды в регионе. Между тем ОИС северо-восточного шельфа Черного моря изучен недостаточно. Исторические данные за период наблюдений 1964–1982 гг. приводятся лишь в монографии 1992 г. [3]. Исследование взаимосвязи ОИС с физическими свойствами и оценка его влияния на точность расчета солёности в северо-восточной части моря до 2022 г. не проводились.

Цель работы – исследование ОИС в одном из наиболее сложных по происхождению там биогеохимическим процессам участке Черного моря – прибрежной зоне северо-восточного шельфа, оценка влияния ОИС на точность определения солёности классическим и современным способами.

Материалы и методы

Отбор проб. Образцы воды отбирались в северо-восточной части Черного моря (Краснодарский край) в населенных пунктах, таких как г. Анапа, пос. Кабардинка, г. Новороссийск, г. Геленджик (Голубая и Геленджикская бухты), с. Дивноморское, с. Архипо-Осиповка, с. Лермонтово, г. Туапсе и пос. Лазаревское, в сентябре 2022 г., июне, сентябре и декабре 2023 г., августе 2024 г., а также в марте и августе 2025 г. (рис. 1).

Пробы помещали в герметичные одноразовые емкости объемом 1,5 л и доставляли в лабораторию для анализа. Сначала определяли содержание карбонат-ионов, общую щёлочность (*total alkalinity*, *AT*) и pH. Затем пробы фильтровали через мембранный фильтр с диаметром пор 0,45 мкм для удаления взвеси и помещали в емкости из боросиликатного стекла объемом 300 мл. Хранили пробы в холодильнике при 4 °С и доставали по мере необходимости в процессе анализа.

Определение солёности. Солёность определяли тремя способами: по сумме ионов (*SS*), по хлорности (*S_{Cl}*) и с использованием плотности (*SA_p*) на основе термодинамического уравнения *TEOS-10*. Для расчета суммы ионов (*SS*) проводили прямые лабораторные химические определения концентраций основных компонентов морской воды. Этот способ считается наиболее надежным для получения солёности [23].

При расчете солёности с помощью хлорного коэффициента (*S_{Cl}*) использовали соотношение из работы [1], которое используется в океанографической практике уже более 40 лет:

$$S = 1,813 \cdot Cl.$$

Абсолютную солёность рассчитывали с использованием значений плотности, полученных в лаборатории, по термодинамическому уравнению *TEOS-10*:

$$SA = SR + \delta SA,$$

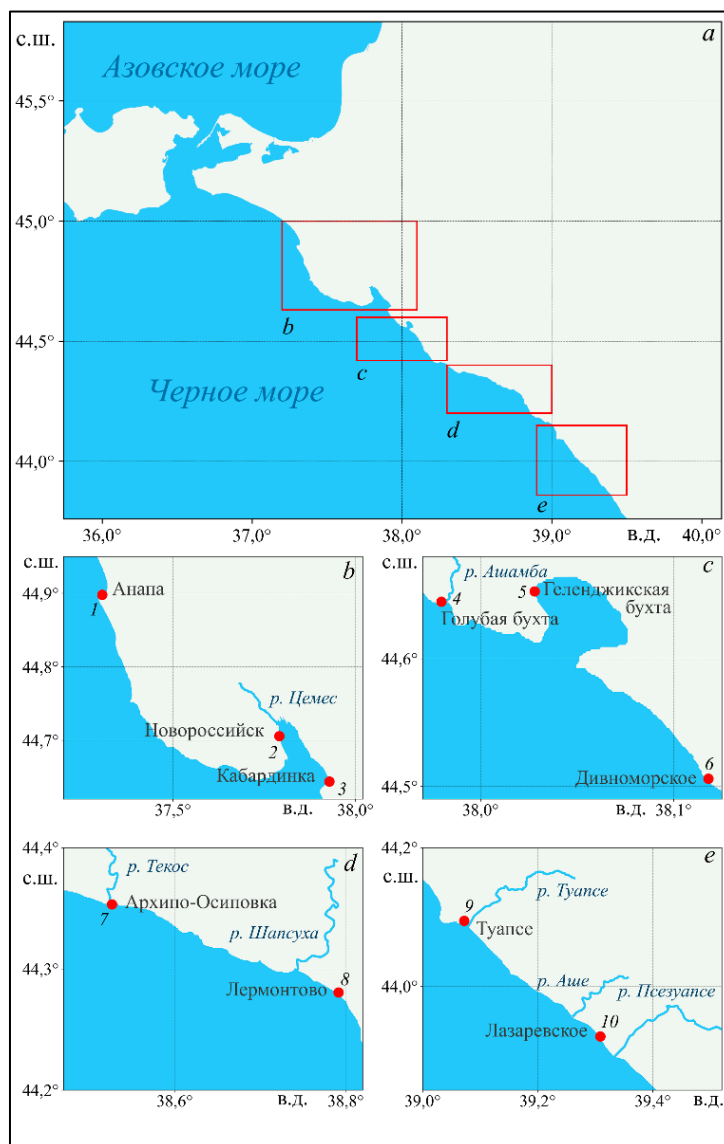
где *SA* – абсолютная солёность (в нашей работе обозначается *SA_p*), г/кг; *SR* – эталонная солёность; δSA – региональная поправка, которая непостоянна в разных морях¹. Значения δSA оценивали по разнице между измеренной плотностью пробы морской воды и плотностью, рассчитанной по уравнению состояния

¹ URL: <http://www.TEOS-10.org> (дата обращения: 10.04.2026) ; URL: <https://www.teos-10.org/software.htm> (дата обращения: 10.04.2026).

TEOS-10 ($\Delta\rho$) при тех же эталонных значениях солености, температуры и давления. Для наших расчетов был выбран алгоритм, наиболее соответствующий имеющимся у нас данным о плотности воды:

$$\delta SA = \Delta\rho / 0,75179,$$

где 0,75179 – коэффициент соленостного сжатия морской воды. Другие алгоритмы *TEOS-10*, требующие данных о практической солености или о карбонатной системе и концентрации макронутриентов, не применялись из-за отсутствия соответствующих измерений.



Р и с. 1. Расположение станций отбора проб в 2022–2025 гг. на карте
Fig. 1. Location of sampling stations in 2022–2025

Для океанической воды с постоянным ионным составом точность расчета солёности зависит от погрешности оборудования и методов и оценивается при расчете с использованием плотности до $\pm 3 \cdot 10^{-6}$ г/см, что эквивалентно погрешности при расчете солёности $\pm 0,4 \cdot 10^{-2}$, по хлорности $\pm 0,2 \cdot 10^{-2}$ г/кг, а по сумме ионов $\pm 0,1 \cdot 10^{-1}$ г/кг [23], или $\sim 0,3$ %.

Но в некоторых внутренних водоёмах и морских акваториях соотношение главных ионов может существенно отличаться от океанического и традиционные методы определения солёности по электропроводности и по хлорности оказываются менее точными, чем по сумме ионов [4].

Солёность морской воды – это общее количество твердых минеральных веществ (солей) в граммах в 1 кг морской воды. Растворенные соли в воде диссоциируют на ионы – анионы (хлориды, сульфат, гидрокарбонат) и катионы (натрий, калий, магний, кальций и др.). Прямые определения концентраций этих ионов позволяют получить их сумму, то есть солёность морской воды в граммах на килограмм. Все остальные способы определения солёности являются косвенными и зависят от различных факторов, определяющую роль в которых играет соотношение главных ионов.

Несмотря на высокую точность значений солёности, полученных по сумме ионов в водах с аномальным ионным составом, использование этого метода очень ограничено из-за его трудоемкости. Лабораторный анализ требует много времени, большого количества реактивов и специального оборудования. Этот способ невозможно применять *in situ*. Определение солёности воды с помощью уравнения *TEOS-10* также не имеет широкого применения, поскольку требует наличия лабораторного плотномера, химического анализа макронутриентов.

Наибольшее практическое распространение имеет определение солёности по электропроводности с помощью *CTD*-зонда. Традиционные измерения *CTD*-зондом не заменимы на сегодняшний день в морских исследованиях, в том числе для оценки турбулентного массообмена в Черном море [16].

Отклонение солёности, полученной по хлорности (ΔS_{Cl}) или по плотности от суммы ионов (ΔS_{Ap}), определяли как

$$\Delta S_{Cl} = SS - S_{Cl},$$

$$\Delta S_{Ap} = SS - S_{Ap}.$$

Определение ОИС. Для получения суммы ионов определяли концентрации главных компонентов ОИС в исследуемых образцах воды Черного моря в соответствии с методиками, подробно описанными в [24], с учетом минерализации черноморской воды. Ионы Cl^- , SO_4^{2-} , HCO_3^- , Ca^{2+} и Mg^{2+} определяли методом потенциометрического титрования, K^+ – гравиметрически, а концентрацию Na^+ рассчитывали как разность между суммой анионов и катионов (в молях эквивалентов) с последующим пересчетом в граммы на килограмм. Для анализа влияния ионного состава на физические характеристики морской воды использовали относительный вклад ионов (массовую долю) в общую минерализацию исследуемых образцов.

Для приготовления растворов реактивов и разбавления проб использовалась деионизированная вода (электропроводность $\sim 0,17$ 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. Плотность определяли в лаборатории с помощью прецизионного плотномера *Anton Paar DMA 5000M* (Австрия) методом колебания *U*-образной трубки. Принцип основан на точном определении характеристической частоты и математическом преобразовании отношения периода колебаний *U*-образной трубки и эталонного генератора ².

Результаты

В табл. 1 представлены результаты настоящего исследования.

Т а б л и ц а 1

Table 1

Гидрохимические характеристики образцов воды северо-восточного побережья Черного моря от г. Анапы до пос. Лазаревское, отобранных в 2022–2025 гг.
Hydrochemical characteristics of water samples collected off the Black Sea northeastern coast from Anapa to Lazarevskoye in 2022–2025

Номер станции / Station number	pH	AT, ммоль/кг / AT, mmol/kg	Соленость, г/кг / Salinity, g/kg			Анионы, % / Anions, %			Катионы, % / Cations, %			
			SS	S _{Cl}	S _{Aρ}	Cl ⁻	SO ₄ ²⁻	HCO ₃ ⁻	Na ⁺	K ⁺	Ca ²⁺	Mg ²⁺
<i>29.09.2022</i>												
1	8,11	3,05	19,00	18,67	18,87	54,21	7,95	0,93	31,40	1,26	1,20	3,06
2	7,93	3,08	17,70	17,32	17,62	53,98	7,98	1,08	31,44	1,34	1,23	2,95
4	8,08	3,11	18,89	18,59	18,68	54,33	7,76	0,96	31,49	1,29	1,11	3,05
5	8,15	3,05	18,59	18,20	18,46	54,01	8,02	1,01	31,45	1,36	1,18	2,98
7	8,01	3,07	18,90	18,55	18,77	54,14	7,93	0,98	31,51	1,25	1,19	2,99
9	8,03	3,07	18,67	18,34	18,70	54,20	7,86	0,99	31,49	1,26	1,23	2,98
10	7,97	3,11	18,36	18,06	18,22	54,26	7,79	1,02	31,54	1,20	1,20	3,00
Среднее / Average	8,04	3,08	18,59	18,25	18,47	54,16	7,90	0,99	31,47	1,28	1,19	3,00
Δm	0,22	0,06	1,30	1,35	1,25	0,35	0,26	0,15	0,14	0,16	0,12	0,11
<i>27.06.2023–29.06.2023</i>												
1	8,20	2,95	18,35	18,10	18,28	54,42	7,99	0,95	30,44	1,27	1,39	3,54
2	8,45	3,10	18,10	17,85	17,95	54,40	7,99	0,98	30,43	1,30	1,34	3,56
5	8,20	3,30	15,05	14,73	14,88	53,97	8,17	1,31	30,28	1,22	1,54	3,51
7	8,15	3,05	16,79	16,58	16,84	54,46	7,82	1,12	30,44	1,19	1,42	3,55
9	8,23	3,02	12,61	12,29	12,42	53,76	8,35	1,43	29,87	1,25	1,77	3,58
10	8,25	2,78	15,24	14,93	15,24	54,03	8,27	1,13	30,29	1,28	1,48	3,53
Среднее / Average	8,25	3,03	16,02	15,75	15,93	54,17	8,09	1,15	30,29	1,25	1,49	3,55
Δm	0,30	0,52	5,74	5,81	5,86	0,70	0,53	0,48	0,57	0,11	0,43	0,07
<i>13.09.2023–14.09.2023</i>												
1	8,35	3,13	18,55	18,29	18,31	54,39	7,91	0,98	30,58	1,30	1,45	3,39
2	8,89	3,07	18,37	18,19	18,19	54,62	7,86	0,83	30,42	1,26	1,54	3,47
3	8,39	3,21	18,36	18,09	18,29	54,35	7,97	1,02	30,45	1,27	1,47	3,47
4	8,45	3,20	18,30	18,07	18,14	54,45	7,92	0,98	30,41	1,26	1,48	3,50
7	8,34	3,09	18,00	17,73	17,84	54,35	7,91	1,06	30,52	1,28	1,46	3,42
8	8,34	3,22	17,85	17,61	17,81	54,40	7,92	1,04	30,33	1,30	1,52	3,50
9	8,46	3,07	18,42	18,19	18,26	54,49	7,86	0,98	30,42	1,29	1,48	3,48
10	8,34	3,22	18,34	18,10	18,16	54,43	7,92	0,96	30,47	1,23	1,59	3,40

² Руководство по эксплуатации DMA 4100 M, DMA 4500 M, DMA 5000 M. Версия программного обеспечения: V1.70. Грац, Австрия : Anton Paar GmbH, 2010. 135 с.

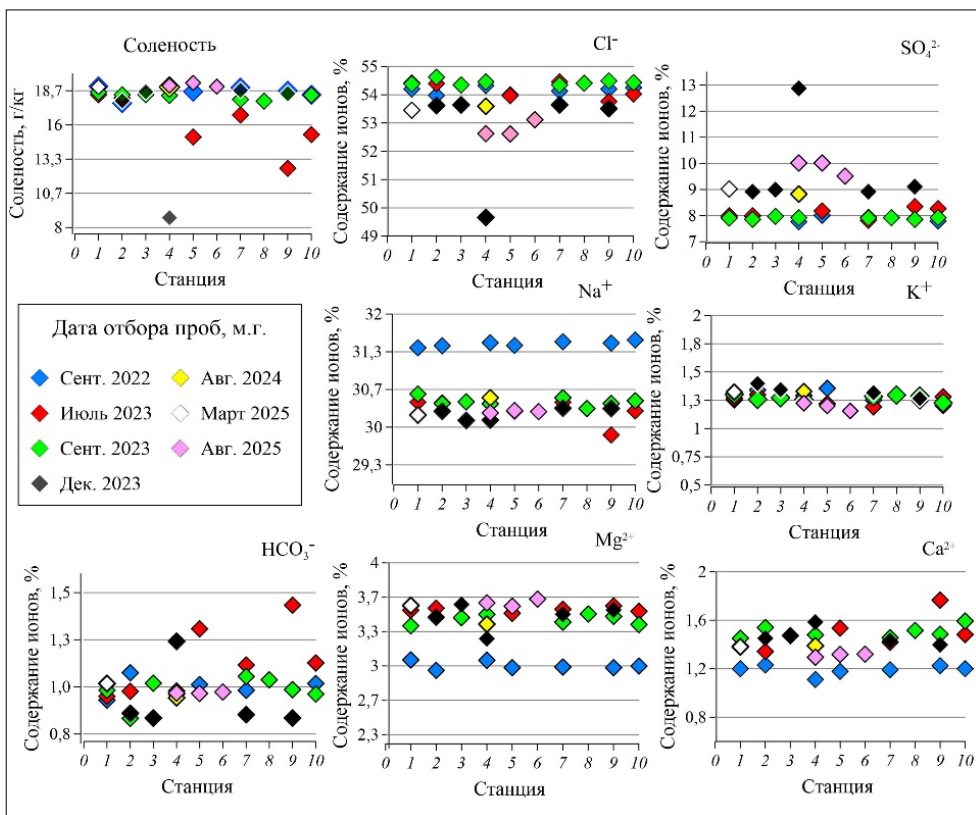
Среднее / Average	8,45	3,15	18,27	18,03	18,13	54,44	7,91	0,98	30,45	1,27	1,50	3,45
Δm	0,55	0,15	0,70	0,68	0,5	0,27	0,11	0,23	0,25	0,07	0,14	0,09
<i>05.12.2023–07.12.2023</i>												
2	8,22	2,36	17,88	17,38	–	53,61	8,91	0,86	30,28	1,40	1,45	3,48
3	8,33	2,41	18,59	18,08	–	53,64	9,00	0,83	30,12	1,34	1,47	3,59
4	8,44	1,65	8,77	7,90	–	49,67	12,88	1,24	30,12	1,24	1,58	3,26
7	8,23	2,43	18,69	18,18	–	53,64	8,92	0,85	30,34	1,32	1,43	3,50
9	8,21	2,33	18,44	17,89	–	53,52	9,11	0,84	30,33	1,27	1,40	3,54
Среднее / Average	8,29	2,24	16,47	15,89	–	52,82	9,76	0,92	30,24	1,31	1,47	3,48
Δm	0,23	0,78	9,92	10,28	–	3,97	3,97	0,41	0,21	0,16	0,18	0,33
<i>10.08.2024</i>												
4	8,17	2,78	18,96	18,42	18,25	53,59	8,83	0,94	30,52	1,33	1,39	3,40
<i>04.03.2025</i>												
1	7,93	3,18	18,96	18,38	18,74	53,96	8,48	0,98	30,33	1,28	1,42	3,55
<i>27.08.2025–29.08.2025</i>												
4	8,60	3,13	19,06	18,19	18,70	52,63	10,02	0,97	30,25	1,23	1,29	3,61
5	8,56	3,28	19,28	18,39	18,97	52,62	10,02	0,96	30,29	1,20	1,31	3,58
6	8,58	3,32	18,99	18,29	18,85	53,12	9,51	0,97	30,27	1,67	1,31	3,65
Среднее / Average	8,58	3,24	19,11	18,29	18,84	52,79	9,85	0,97	30,27	1,37	1,30	3,61
Δm	0,04	0,19	0,28	0,20	0,27	0,50	0,51	0,01	0,04	0,47	0,02	0,07

Количество станций в каждой экспедиции различается: в сентябре 2022 г. – 7, в июне 2023 г. – 6, в сентябре 2023 г. – 8, в декабре 2023 г. – 5; в августе 2024 г. – 1, в марте 2025 г. – 1, а в августе 2025 г. – 3. На каждой станции было отобрано по одной пробе.

Значения pH исследуемых образцов черноморской воды находятся в диапазоне 7,90–8,89 (табл. 1). Общая щелочность в основном варьировала от 2,33 до 3,30 ммоль/кг, за исключением декабря 2023 г., когда на ст. 4 в районе стока Ашамбы АТ составила 1,65 ммоль/кг при низкой солёности воды ($SS = 8,77$ г/кг).

Значения SS , S_{Cl} и S_{Ar} различаются (табл. 1): наибольшее у SS , наименьшее в большинстве случаев характерно для S_{Cl} . Величина Δm (размах) служит мерой неоднородности водной массы по каждому из определяемых параметров (pH, АТ, солёность, относительное содержание ионов) между станциями. Например, в сентябре 2022, 2023 гг. и августе 2025 г. вдольбереговые водные массы были почти однородными по солёности в направлении от Анапы до пос. Лазаревское ($\Delta m = 0,2 \dots 1,3$), а в конце июня 2023 г., напротив, отмечена высокая неоднородность ($\Delta m \sim 5,8$).

На рис. 2 представлена динамика относительного содержания компонентов ОИС и солёности в 2022–2025 гг. (по данным табл. 1). Относительное содержание Cl^- в прибрежной черноморской воде за весь период исследования находилось в диапазоне 52,6–54,6 %, SO_4^{2-} – 7,8–12,9 %, HCO_3^- – 0,8–1,4 %, Na^+ – 29,9–31,5 %, Ca^{2+} – 1,1–1,8 %, Mg^{2+} – 3–3,7 %. Содержание в ОИС SO_4^{2-} , HCO_3^- , и Ca^{2+} изменялось почти в два раза, что связано с существенным распреснением и, возможно, загрязнением морской воды материковым стоком.



Р и с. 2. Сумма ионов и относительное содержание компонентов ОИС в составе прибрежных вод северо-восточной части Черного моря в населенных пунктах от г. Анапы до пос. Лазаревское в период 2022–2025 гг.

F i g. 2. Sum of ions and relative content of MIC components in coastal waters of the northeastern Black Sea (in the settlements from Anapa to Lazarevskoye) in 2022–2025

За весь период наблюдения SS большинства проб составила в среднем 18,40 г/кг. Максимальное значение ($SS = 19,11$ г/кг) было зафиксировано в августе 2025 г. в Геленджикской бухте (ст. 4), а минимальное ($SS = 8,77$ г/кг) в декабре 2023 г. в Голубой бухте в районе стока р. Ашамбы (ст. 3).

На рис. 2 видно, что пробы воды, отобранные в сентябре 2022 г., существенно выделяются среди всех остальных проб. По сравнению со средним содержанием главных ионов в остальных пробах за весь период исследования содержание Na^+ было повышено на $\sim 4\%$, а Ca^{2+} и Mg^{2+} понижено на $\sim 20\%$ и $\sim 14\%$ соответственно. При этом водная масса была практически однородной от Анапы до пос. Лазаревское по ОИС и солёности (Δm составила 0,1–0,4). Среднее значение солёности этих проб было близким к среднему за весь период наблюдений ($SS = 18,40$ г/кг) и составило 18,59 г/кг.

Образцы воды, отобранные в июне 2023 г., характеризовались самой низкой солёностью из всех (SS от 12,61 до 18,35 г/кг). В ОИС образцов с пониженной солёностью преобладали гидрокарбонат-ионы (до 1,4% на ст. 9, г. Туапсе). Здесь же наблюдалось и самое большое содержание ионов кальция

среди всех исследованных проб (до 1,77%). На ст. 5, 9 и 10 содержание сульфатов было несколько выше, чем на других станциях в этой экспедиции.

В сентябре 2023 г. наблюдалось однообразие по солености и соотношению главных ионов в составе между всеми образцами воды, как и в сентябре 2022 г. Средняя соленость проб составила 18,27 г/кг (Δm составила $\sim 0,6$ г/кг) а ОИС воды отличался большим содержанием катионов магния и кальция по сравнению с сентябрем 2022 г.

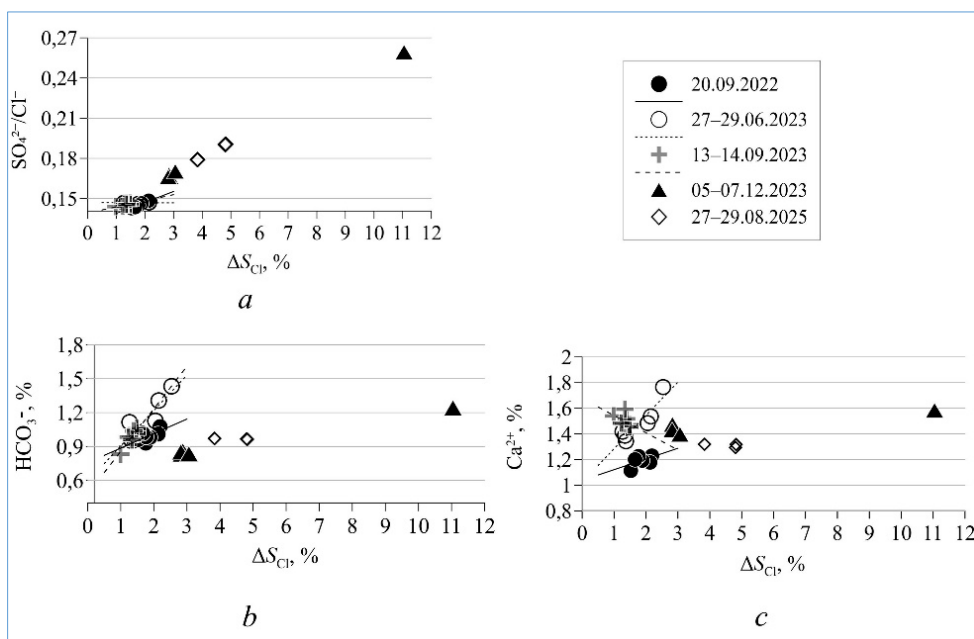
В декабре 2023 г. ОИС значительно отличался от ОИС проб, полученных в другое время, хотя соленость соответствовала средней, соответствующей большинству изученных образцов и составила $SS = 18,40$ г/кг. Соотношение SO_4^{2-}/Cl^- в декабре 2023 г. было высоким и составило 0,17, а содержание HCO_3^- , наоборот, самым низким из всех исследованных проб $\sim 0,85$ %. Исключение составил образец со ст. 4 (в районе стока р. Ашамба). Речные воды распреснили черноморскую воду до $SS = 8,77$ г/кг. ОИС этих вод существенно отличался от состава всех исследованных проб воды, представленных в данной работе. Относительное содержание сульфатов было в $\sim 1,4$ раза выше, а хлоридов в $\sim 1,1$ раза ниже, чем в других пробах, полученных в экспедиции в декабре 2023 г. Соотношение SO_4^{2-}/Cl^- на ст. 4 составило 0,26, что характерно больше для речных вод. Содержание HCO_3^- на ст. 4 было в 1,5 раза выше, а содержание Mg^{2+} – на 8 % ниже, чем в других пробах за этот период.

В экспедиции в августе 2024 г. в Голубую Бухту (ст. 4) и в марте 2025 г. в г. Анапу (ст. 1) было отобрано по одной пробе воды, соленость которой составила 18,78 и 18,96 г/кг соответственно. В ОИС этих проб содержание сульфат-ионов довольно велико, в отличие от большинства проб, а SO_4^{2-}/Cl^- составило 0,18 и 0,17 соответственно.

Содержание катионов K^+ было достаточно стабильно во всех исследуемых пробах: в среднем 1,28 % (Δm составила 0,05–0,16 %), максимальное значение (1,40 %) зафиксировано в декабре 2023 г. на ст. 2, а минимальное – в сентябре 2022 г. на ст. 9 (1,20 %).

Влияние ионного состава на физические свойства воды. На рис. 3 показана взаимосвязь ОИС и величин ΔS_{Cl} и ΔS_{Ar} . За период наблюдений 2022–2025 гг. ΔS_{Cl} находилась в диапазоне 0,1–11,1 %, а ΔS_{Ar} – 0–4 %. В декабре 2023 г. и августе 2025 г. повышение ΔS_{Cl} коррелировало с ростом тренда SO_4^{2-}/Cl^- , тогда как содержание HCO_3^- и Ca^{2+} было почти одинаковым на трех станциях с высокой соленостью (в среднем $SS = 18,40$ г/кг) и на повышение ΔS_{Cl} не влияло. Это явление замечено во всех образцах воды, полученных в декабре 2023 г., кроме образца со ст. 4, где при самой низкой наблюдаемой солености ($SS = 8,77$ г/кг) и существенно отличном от других проб ОИС значение ΔS_{Cl} было самым большим (11,05 %) и зависело от всех трех компонентов (SO_4^{2-} , HCO_3^- и Ca^{2+}) сразу.

В конце июня 2023 г. значение ΔS_{Cl} достигало 2,5 %, при этом связь с отношением SO_4^{2-}/Cl^- отсутствовала (рис. 3, а). Наоборот, рост содержания HCO_3^- и Ca^{2+} коррелировал с повышением ΔS_{Cl} на всех станциях (рис. 3, б и с).



Р и с. 3. Взаимосвязь ΔS_{Cl} с относительным содержанием SO_4^{2-} (a), HCO_3^- (b) и Ca^{2+} (c) в ОИС прибрежных вод северо-восточной части Черного моря, по данным пяти экспедиций

F i g. 3. Relationship between ΔS_{Cl} and relative content of SO_4^{2-} (a), HCO_3^- (b) and Ca^{2+} (c) in MIC of coastal waters of the northeastern Black Sea based on the data of five expeditions

В сентябре 2023 г. значения ΔS_{Cl} в образцах были сходны, а небольшой рост ΔS_{Cl} связан с повышением SO_4^{2-} , и HCO_3^- . Связи между содержанием Ca^{2+} , близким во всех образцах, и увеличением ΔS_{Cl} не наблюдалось.

В итоге за исследуемый период выявлена вполне определенная взаимосвязь ΔS_{Cl} с содержанием SO_4^{2-} , HCO_3^- и Ca^{2+} в ОИС. Рост ΔS_{Cl} сопровождался повышением содержания в составе воды всех трех ионов одновременно, а также каждого по отдельности или попарно.

На рис. 4 представлена взаимосвязь ΔSA_p с ионным составом черноморских вод. Видно, что зависимость ΔSA_p от изменения ОИС неоднозначна для четырех экспедиций. В сентябре 2022 и 2023 гг. связи между повышением значения ΔSA_p и изменением содержания SO_4^{2-} , HCO_3^- и Ca^{2+} не наблюдалось. В июне рост тренда ΔSA_p сопровождался повышением относительного содержания HCO_3^- и Ca^{2+} . А в августе 2025 г. рост ΔSA_p сопровождался повышением SO_4^{2-}/Cl^- .

К сожалению, плотность образцов воды из экспедиции в декабре 2023 г. определить не удалось, поэтому ΔSA_p для них не рассчитывали.

Таким образом, явная взаимосвязь ΔSA_p с ОИС наблюдалась только для проб воды, отобранных в июне 2023 г., то есть для проб с существенно пониженной относительно средней величины соленостью, а рост ΔSA_p зависел от повышения относительного содержания HCO_3^- и Ca^{2+} в ОИС воды.

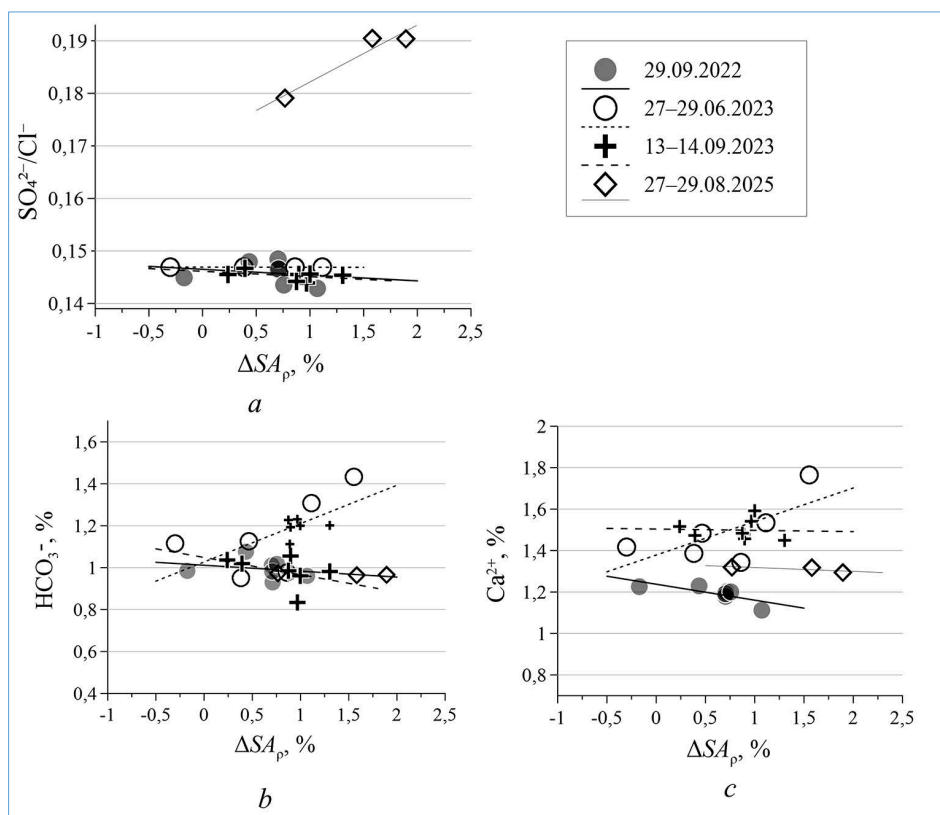


Рис. 4. Взаимосвязь ΔSA_p с относительным содержанием SO_4^{2-} (a), HCO_3^- (b) и Ca^{2+} (c) в ОИС прибрежных вод северо-восточной части Черного моря, по данным четырех экспедиций

Fig. 4. Relationship between ΔSA_p and relative content of SO_4^{2-} (a), HCO_3^- (b) and Ca^{2+} (c) in MIC of coastal waters of the northeastern Black Sea based on the data of four expeditions

Обсуждение

Перемещение водных масс, поступление речного стока и биогеохимические процессы в прибрежной зоне приводят к сезонным колебаниям физико-химических свойств морской воды. При смешении речных и морских вод значительно изменяется поведение почти всех химических элементов. На некоторые из них морская вода оказывает растворяющее действие, другие, напротив, резко теряют геохимическую подвижность и выпадают в осадок [11, 25]. Состав терригенного материала на геохимическом барьере река – море существенно изменяется. Например, ~ 80 % обменного кальция замещается в основном натрием и – в меньшей степени – магнием и калием [26].

Сравнительный анализ выявил существенную пространственно-временную изменчивость солености и относительного содержания компонентов ОИС в прибрежных водах северо-восточного шельфа Черного моря. Причины этих изменений различны, поэтому для их понимания каждую экспедицию необходимо рассматривать отдельно. На рис. 2 представлен анализ изменения солености (SS) воды за период с 2022 по 2025 г. отдельно по каждой станции (по данным из табл. 1). Наименьшие значения суммы ионов зафиксированы

в пробах воды, отобранных в июне 2023 г. на станциях от г. Геленджика до пос. Лазаревское: они находились в диапазоне 12–18 г/кг. Распределение воды в прибрежной зоне было вызвано, вероятнее всего, сильными ливнями, переполнившими сток горных рек в море. Сток горных рек присутствовал в районе практически каждого населенного пункта, в котором отбирались пробы воды (см. рис. 1). Присутствие речных вод в образцах, полученных в июне 2023 г., подтверждается повышенным относительным содержанием HCO_3^- в образцах со ст. 5, 7, 9 и 10 и SO_4^{2-} – со ст. 5, 9 и 10. Повышенное содержание Ca^{2+} и пониженное Na^+ в составе образца со ст. 9 (г. Туапсе) указывает на активные сорбционно-десорбционные процессы, характерные для области река – море [10]. Большинство рек северо-восточной части моря сбрасывают более 80 % своего стока в зимне-весенний период, что связано с преобладанием в их питании дождевой составляющей [27], однако и в летний период для данного региона характерны мощные ливни, часто вызывающие наводнения [28]. Максимальное содержание ионов, обычно преобладающих в речном стоке (HCO_3^- , SO_4^{2-} и Ca^{2+}), и минимальное содержание ионов, характерных для морских вод (Cl^- , Na^+), указывают на доминирование речных вод в образцах. По всей вероятности, источником этих вод в июне 2023 г. была р. Туапсе, которая образуется слиянием двух горных рек и впадает в море около г. Туапсе, недалеко от места отбора проб. Бассейн р. Туапсе расположен в области полувлажных субтропиков и является самым селеопасным из всех рек Черноморского побережья России. Паводки здесь возникают в любое время года (кроме августа, сентября и октября) из-за обильных осадков. При этом уровень воды в реках может подниматься на 6–8 м [29].

В декабре 2023 г. очень низкая для черноморских вод соленость ($SS = 8,77$ г/кг) в Голубой бухте на ст. 4 была обусловлена обильным стоком из небольшой (12 км) р. Ашамбы. Ее исток находится в горах, а наполнение стока существенно зависит от осадков. Во время паводков уровень воды в реке резко повышается [30], а речной сток в море усиливается. Как показали исследования в декабре 2023 г., речной сток преобразует ОИС морских вод в сторону повышения относительного содержания SO_4^{2-} и HCO_3^- и понижения содержания Mg^{2+} .

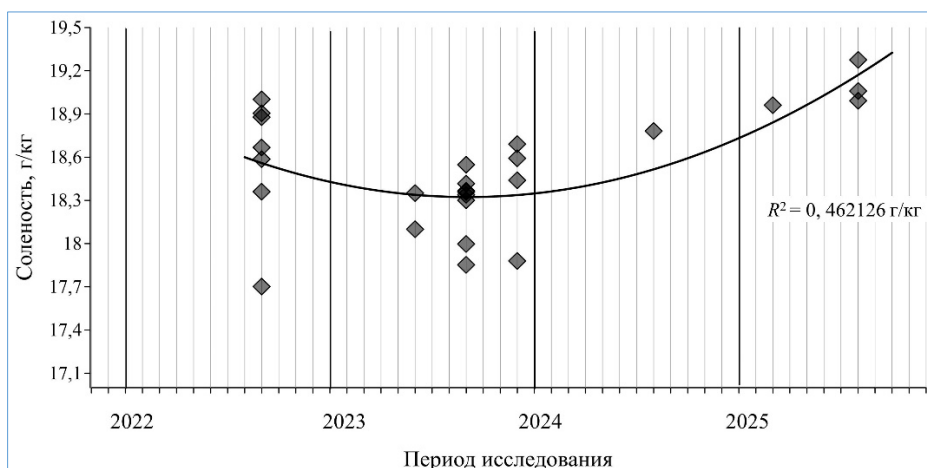
Длительное отсутствие интенсивных осадков и умеренный речной сток способствуют поступлению вод открытой части моря в прибрежные зоны, при этом ОИС и соленость вдоль северо-восточного побережья выравниваются, формируется единая водная масса. Можно предположить, что до середины сентября 2022 г. обильных осадков, которые могли бы спровоцировать интенсивный речной сток в море, продолжительное время не было, поэтому вода у побережья от г. Анапы до пос. Лазаревское была по своему составу наиболее близка к водам открытой части моря. В табл. 2 сравниваются осредненные значения относительного содержания компонентов ОИС водных масс, наблюдаемых в сентябре 2022 и 2023 гг. от г. Анапы до пос. Лазаревское, а также водной массы, образцы которой были получены в сентябре 2022 г. на пути следования МНИС «Ашамба» от Голубой Бухты в Керченский пролив на расстоянии ~ 10 км от берега (по данным работы [24]).

Т а б л и ц а 2
T a b l e 2

**Основной ионный состав водных масс северо-восточного побережья
Черного моря от г. Анапы до пос. Лазаревское и от г. Геленджика
до Керченского пролива в сравнении с характеристиками СМВ
Major ionic composition of water masses off the Black Sea northeastern
coast from Anapa to Lazarevskoye, and from Gelendzhik
to the Kerch Strait as compared to the SSW characteristics**

Район отбора проб / Sampling area	Дата / Date	Соле- ность, г/кг / Salinity, g/kg	Анионы, % / Anions, %			Катионы, % / Cations, %				Источник данных / Source of data
			Cl ⁻	SO ₄ ²⁻	HCO ₃ ⁻	Na ⁺	K ⁺	Ca ²⁺	Mg ²⁺	
г. Анапа – пос. Лазаревское (Сочи) / Анапа – Lazarevskoye (Sochi)	Сентябрь 2022 г. / Septem- ber, 2022	18,59	54,16	7,90	0,99	31,47	1,28	1,19	3,00	[12]
	Сентябрь 2023 г. / Septem- ber, 2023	18,27	54,43	7,91	0,98	30,45	1,27	1,50	3,45	Настоящее исследова- ние / Present study
г. Геленджик – Керченский про- лив / Gelendzhik – Kerch Strait	Сентябрь 2022 г. / Septem- ber, 2022	18,75	54,23	8,21	0,99	30,33	1,25	1,39	3,59	[12]
Атлантический океан (СМВ) / Atlantic Ocean (SSW)	–	35,17	55,07	7,82	0,35	30,82	1,22	1,19	3,53	[2]

На рис. 5 показана межгодовая изменчивость солености прибрежных вод северо-восточного шельфа Черного моря. Она изображена сплошной линией полинома второй степени, коэффициенты которого подобраны минимизацией среднеквадратичного отклонения от полученных данных. За четыре года исследований (2022–2025 гг.) в прибрежных водах наблюдается тенденция к росту солености. Ранее стало известно, что физические и биогеохимические свойства водной толщи Черного моря под влиянием естественных и антропогенных причин изменяются со временем. Температура воздуха и поверхности моря, а также соленость вод за последние 40 лет повысились, а ледовитость и приходная пресная часть водного баланса снизились [31]. Обнаружено, что в последнее десятилетие рост практической солености в верхнем 200-метровом слое моря составляет около 0,05–0,06 ЕПС в год. Это изменяет плотность воды и может влиять на положение нижней границы кислородсодержащего слоя [32]. Наряду с перечисленными причинами, дополнительный вклад в повышение солености прибрежных вод Черного моря, особенно в курортных районах, может вносить загрязненный материковый сток. Однако из-за ограниченного количества данных и небольшого периода наблюдений это предположение требует подтверждения дополнительными исследованиями.



Р и с. 5. Тенденция изменения солености за 2022–2025 гг.
Fig. 5. Trend of salinity change in 2022–2025

Исторические данные о солености, полученной по сумме ионов, в районе северо-восточного шельфа Черного моря в литературных источниках найти почти невозможно. С конца XX в. считалось, что соленость поверхностных вод моря в целом изменяется от 17,5 до 18,3 г/кг [5]. В работе [1] указана соленость поверхностных вод в восточной части моря (18,10 и 18,54 г/кг). В монографии 1992 г. упоминается соленость в восточной части моря в ноябре 1977 г., равная 18,50 г/кг, а в марте 1986 г. – 18,09 г/кг [3]. Результаты данного исследования показывают, что современная соленость превышает исторические значения.

Для оценки отличий черноморских вод от океанической воды в табл. 2 приводится относительный ОИС стандартной морской воды (СМВ). Из табл. 2 видно, что соленость водных масс северо-восточной части Черного моря почти в два раза ниже, чем у СМВ, а их относительный ОИС из-за присутствия речных и азовоморских вод существенно отличается от состава СМВ и имеет пространственно-временную изменчивость. Несмотря на непостоянство ОИС черноморских водных масс, в осредненном составе (без интенсивного влияния стока) содержится на ~ 1 % меньше хлоридов и на ~ 0,4 % меньше Na^+ в большинстве случаев, но больше на ~ 0,1 % сульфатов, на ~ 0,3 % ионов кальция и примерно в три раза больше гидрокарбонатов, чем в СМВ. Поступление материкового стока увеличивает относительное содержание HCO_3^- и Ca^{2+} и SO_4^{2-} в ОИС морских вод.

В ходе данной работы обнаружена пространственно-временная изменчивость гидрохимических свойств прибрежных водных масс в районе северо-восточного шельфа Черного моря, связанная в основном с присутствием или отсутствием речного стока, и проведена ее оценка. В августе 2025 г. существенное повышение отношения $\text{SO}_4^{2-}/\text{Cl}^-$ наблюдалось в отсутствие существенного влияния речного стока. Сульфаты поступают в Черное море, как и в океан, из различных источников: с продуктами вулканической деятельности, при разложении органического вещества бактериями в глубинных слоях и на дне водоема, с речными водами при растворении горных пород, а также из воздуха.

Кроме того, SO_4^{2-} поступает из Средиземного моря, а также значительное количество – в результате хозяйственной деятельности с загрязненным материковым стоком [3, 33–35]. На август приходится пик курортного сезона на побережье Краснодарского края, осадки в это время, как правило, отсутствуют. Поэтому повышение сульфатов в ОИС вод может быть связано с поступлением большого объема хозяйственно-бытовых сточных вод в море. Оценка влияния сточных вод на ОИС требует дополнительного исследования. HCO_3^- и Ca^{2+} обычно поступают в море с речным стоком, в результате повторного растворения донных отложений и других процессов.

ОИС определяет соленость морской воды. Расчет солености в такой сложной среде, как прибрежная часть северо-восточного шельфа Черного моря, – непростая задача. Ранние исследования показали, что отклонения при расчете солености различными способами, например в Керченском проливе, могут достигать: по электропроводности (CTD-зонд) и по хлорности – до 3 %, по плотности – до 2 %, а в заливах и лагунах – еще больше [4, 12]. Максимальные значения отклонения в наших данных были гораздо выше: при расчете солености по хлорности воды (ΔS_{Cl}) в прибрежных водах северо-восточного шельфа Черного моря оно составило ~ 5 % (в августе 2025 г.) и 11 % (в устье реки в декабре 2023 г.), а по плотности (ΔS_{A_p}) – ~ 4 % (в августе 2024 г.). Поскольку соленость тесно связана с вариациями ОИС, ни один из этих способов не дает точного результата. В уравнении *TEOS-10* не учитывается влияние дополнительного количества всех макроэлементов, поступающих извне (например, сульфатов). Его применение в прибрежных водах Черного моря может использоваться лишь для получения приблизительной оценки солености вод в пределах обнаруженных отклонений. Кроме того, повышенное содержание биогенных веществ также влияет на точность расчета солености по *TEOS-10* во внутренних морях [34]. Сравнение полученных результатов с аналогичными исследованиями [4, 12] показало, что снижение солености в прибрежных водах северо-восточного шельфа в период интенсивного речного стока более существенно, а ошибки при расчете солености по хлорности и по плотности больше, чем, например, в Керченском проливе.

Как показали результаты нашего исследования, наиболее точные значения солености прибрежных вод Черного моря в настоящее время можно получить только суммой ионов. Остальные способы могут дать только приблизительные ее оценки.

Выводы

В ходе работы получены новые гидрохимические данные о прибрежных водах северо-восточного шельфа Черного моря от г. Анапы до пос. Лазаревское (Сочи) за период наблюдения с 2022 по 2025 г. Обнаружена существенная пространственно-временная изменчивость солености и ОИС вод. За исследуемый период относительное содержание ионов в составе воды составило: Cl^- – 52,6–54,6 %, SO_4^{2-} – 7,8–12,9 %, HCO_3^- – 0,8–1,4 %, Na^+ – 29,9–31,5 %, Ca^{2+} – 1,1–1,8 % и Mg^{2+} – 3–3,7 %. Содержание SO_4^{2-} , HCO_3^- , и Ca^{2+} изменялось почти в два раза. Предварительные результаты указывают на тенденцию к росту солености со временем в прибрежных водах северо-восточного шельфа Черного

моря. Причинами колебаний солености и ОИС служат изменчивый речной сток и, возможно, поступление хозяйственно-бытовых сточных вод.

Выполнено сравнение трех методов определения солености: по сумме ионов (SS), по хлорному коэффициенту (S_{Cl}) и по плотности с использованием уравнения $TEOS-10$ (SA_p). Наиболее точным из этих методов для вод Черного моря является расчет по сумме ионов. Это заключение, вероятно, справедливо и для водоемов аналогичного типа.

Обнаружена взаимосвязь повышения солености при определении ее по хлорности с повышением содержания SO_4^{2-} , HCO_3^- и Ca^{2+} . При расчете солености по плотности вод такой взаимосвязи не наблюдалось.

Отклонения результатов расчета солености по хлорности от результатов ее расчета по сумме ионов достигали в прибрежной морской воде 5% (при $SS = 19$ г/кг), или 0,9 г/кг, и непосредственно в устье реки 11% (при $SS = 9$ г/кг), или 0,9 г/кг, а по плотности с использованием уравнения $TEOS-10$ в прибрежной морской воде с соленостью 19 г/кг – 4%. Сравнение полученных данных с ранними результатами показало, что распределение морских вод в прибрежной части северо-восточного шельфа Черного моря может быть более выраженным, а максимальные отклонения расчета солености – большими, чем, например, в водах Керченского пролива.

Преимущество использования предложенного авторами метода определения солености по ОИС или сумме ионов состоит не только в повышении точности получаемых результатов по солености, но и в возможности определения причин ее изменения, обусловленных сезонными вариациями содержания некоторых ионов (SO_4^{2-} , HCO_3^- , и Ca^{2+}) в прибрежных акваториях. Существенным недостатком метода остаются его трудоемкость и долговечность.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *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 (eds.). Tulsa : American Association of Petroleum Geologists, 1974. P. 151–154. (AAPG Memoir ; vol. 20). <https://doi.org/10.1306/M20377C44>
2. 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. <https://doi.org/10.1016/j.dsr.2007.10.001>
3. Гидрометеорология и гидрохимия морей СССР. Том 4 : Черное море. Вып. 2 : Гидрохимические условия и океанологические основы формирования биологической продуктивности. Санкт-Петербург : Гидрометеониздат, 1992. 220 с.
4. *Андрюлионис 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 JMZYYQ. <https://doi.org/10.22449/0233-7584-2022-5-481-498>
5. *Сорокин Ю. И.* Черное море: природа, ресурсы. Москва : Наука, 1982. 216 с.
6. *Deuser W. G.* Evolution of anoxic conditions in the Black Sea during the Holocene // *The Black Sea – geology, chemistry, and biology* / E. T. Degens, D. A. Ross (eds.). Tulsa : American Association of Petroleum Geologists, 1974. P. 133–136. (AAPG Memoir ; vol. 20).
7. *Иванов В. А., Белокопытов В. Н.* Океанография Черного моря. Севастополь, 2011. 212 с.
8. 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. <https://doi.org/10.31857/S003015742106006X>

9. Гидрофизические и гидрохимические характеристики морских акваторий у устьев малых рек российского побережья Черного моря / П. О. Завьялов [и др.] // *Океанология*. 2014. Т. 54, № 3. С. 293–308. EDN SEEDFF. <https://doi.org/10.7868/S0030157414030150>
10. *Savenko A. V., Savenko V. S.* Adsorbed chemical elements of river runoff of solids and their role in the transformation of dissolved matter runoff into the ocean // *Minerals*. 2022. Vol. 12, iss. 4. 445. EDN CWNSCA. <https://doi.org/10.3390/min12040445>
11. *Гордеев В. В.* Геохимия речного стока в Черное море // *Система Черного моря*. Москва : Научный мир, 2018. С. 247–286.
12. *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.
13. *Альтман Э. М., Кумыш Н. И.* Многолетняя внутригодовая изменчивость баланса пресных вод Черного моря // *Труды ГОИН*. 1986. Вып. 176. С. 3–18.
14. Гидрометеорология и гидрохимия морей СССР. Т. 4 : Черное море. Вып. 1 : Гидрометеорологические условия. Ленинград : Гидрометеониздат, 1991. 429 с.
15. *Джаошвили Ш.* Реки Черного моря. Европейское агентство по охране окружающей среды, 2002. 58 с. (Технический отчет № 71). URL: http://www.eea.europa.eu/ru/publications/technical_report_2002_71/at_download/file (дата обращения: 10.05.2026).
16. *Косьян Р. Д., Подымов И. С., Пыхов Н. В.* Динамические процессы береговой зоны моря. Москва : Научный мир, 2003. 325 с.
17. *Le Menn M., Nair R.* Review of acoustical and optical techniques to measure absolute salinity of seawater // *Frontiers in Marine Science*. 2022. Vol. 9. 1031824. EDN EOYVWX. <https://doi.org/10.3389/fmars.2022.1031824>
18. An optical Michelson interferometric spectrometer-based seawater density sensor with improved long-term stability in the deep-sea trial / X. Bai [et al.] // *Measurement*. 2025. Vol. 250, 117230. EDN WENZFO. <https://doi.org/10.1016/j.measurement.2025.117230>
19. *Pawlowicz R.* Key Physical variables in the ocean: temperature, salinity, and density // *Nature Education Knowledge*. 2013. Vol. 4, № 4. 13.
20. *Woosley R. J., Huang F., Millero F. J.* Estimating absolute salinity (SA) in the world's oceans using density and composition // *Deep Sea Research Part I: Oceanographic Research Papers*. 2014. Vol. 93. P. 14–20. <https://doi.org/10.1016/j.dsr.2014.07.009>
21. *Meybeck M.* Global occurrence of major elements in rivers // *Surface and Ground Water, Weathering and Soils* / H. D. Holland, K. K. Turekian (eds.). Amsterdam : Elsevier, 2004. P.207–223. (Treatise of Geochemistry ; vol. 5). <https://doi.org/10.1016/B0-08-043751-6/05164-1>
22. *Korotenko K., Osadchiv A., Melnikov V.* Mesoscale Eddies in the Black Sea and Their Impact on River Plumes: Numerical Modeling and Satellite Observations // *Remote Sensing*. 2022. Vol. 14, iss. 17. 4149. EDN PNTZNJ. <https://doi.org/10.3390/rs14174149>
23. *Millero F. J.* *Chemical Oceanography*. 4th Edition. Boca Raton : CRC Press, 2013. 591 p. <https://doi.org/10.1201/b14753>
24. *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. <https://doi.org/10.22449/0233-7584-2019-1-16-36>
25. *Гордеев В. В.* Геохимия системы река-море. Москва : Матушкина И.И., 2012. 452 с. EDN QKKVPR.
26. *Савенко А. В.* Экспериментальные модели сорбционно-осадительных геохимических барьеров в океане. Москва : ГЕОС, 294 с.
27. *Маккавеев П. Н., Завьялов П. О.* Сток малых и средних рек российского побережья Черного моря и его влияние на характеристики вод // *Система Черного моря*. Москва : Научный мир, 2018. С. 287–322. EDN THXVYZ. <https://doi.org/10.29006/978-5-91522-473-4.2018.287-322>
28. *Магрицкий Д. В.* Пространственно-временные характеристики наводнений на Черноморском побережье Российской Федерации // *Вестник Московского университета. Серия 5. География*. 2014. № 6. С. 39–47. EDN RKANGI.

29. Causes and systematics of inundations of the Krasnodar territory on the Russian Black Sea coast / N. Alexeevsky [et al.] // *Natural Hazards and Earth System Science*. 2016. Vol. 16, iss. 6. P. 1289–1308. EDN WVMUAT. <https://doi.org/10.5194/nhess-16-1289-2016>
30. Топонимика Геленджика и его окрестностей : сборник. Вып. 3 : Населенные пункты / сост.: Т. Г. Мигун. Геленджик, 2008. 42 с.
31. Climate change in the hydrometeorological parameters of the Black and Azov Seas (1980–2020) // *Oceanology*. 2021. Vol. 61. P. 745–756. EDN PNFCAF. <https://doi.org/10.1134/S0001437021060060>
32. *Podymov O. I., Zatsepin A. G., Ostrovskii A. G.* Fine structure of vertical density distribution in the Black Sea and its relationship with vertical turbulent exchange // *Journal Marine Science and Engineering*. 2023. Vol. 11, iss. 1. 170. EDN URLMAH. <https://doi.org/10.3390/jmse11010170>
33. The history of Earth’s sulfur cycle / M. Fakhraee [et al.] // *Nature Reviews Earth and Environment*. 2025. Vol. 6, iss. 2. P. 106–125. EDN ERSSGN. <https://doi.org/10.1038/s43017-024-00615-0>
34. Роль анаэробных бактерий в экосистемах Черного моря / М. В. Иванов [и др.] // *Природа*. 1998. № 6. С. 97–103.
35. The salinity anomalies due to nutrients and inorganic carbon in the Bohai Sea / F. Ji [at al.] // *Frontiers in Marine Science*. 2024. Vol. 11. 1418860. EDN IALFCF. <https://doi.org/10.3389/fmars.2024.1418860>

Об авторах:

Андрулионис Наталья Юрьевна, старший научный сотрудник, Лаборатория взаимодействия океана с водами суши и антропогенных процессов, Институт океанологии им. П. П. Ширшова РАН (Российская Федерация, 117997, Москва, Нахимовский проспект, д. 36), кандидат географических наук, **SPIN-код: 9040-2714, ORCID ID: 0000-0001-9141-1945, Web of Science Researcher ID: 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), **SPIN-код: 6576-0430, ORCID ID: 0009-0004-0083-4475, Web of Science Researcher ID: AGQ-4773-2022**, i.zav@ocean.ru

Завьялов Петр Олегович, главный научный сотрудник, руководитель Лаборатории взаимодействия океана с водами суши и антропогенных процессов, заместитель директора по физическому направлению, Институт океанологии им. П. П. Ширшова РАН (117997, Российская Федерация, Москва, Нахимовский проспект, д. 36), доктор географических наук, член-корреспондент РАН, **SPIN-код: 2805-6673, ORCID ID: 0000-0002-3712-8302, Scopus Author ID: 6603611237, Researcher ID: E-7026-2014**, peter@ocean.ru