

Особенности химического состава вод устьевых областей рек Большого Сочи, северо-восточная часть Черного моря

Ю. А. Моисеева , Д. В. Пургина, Т. К. Поливанова

*Автономная некоммерческая образовательная организация
высшего образования «Научно-технологический университет «Сириус»,
Федеральная территория «Сириус», Россия*
 jamoiseeva@mail.ru

Поступила в редакцию 30.04.2025; одобрена после рецензирования 16.05.2025;
принята к публикации 11.07.2025.

Аннотация

Цель. Выявлены характерные особенности содержания растворенных форм макрокомпонентов и биогенных элементов в устьевых областях рек Большого Сочи (Сочи, Мацеста, Хоста, Кудепста и Мзымта).

Методы и результаты. Пробы поверхностных вод отбирались в начале ноября в период осенне-зимних паводков в устьевых областях рек Сочи, Мацесты, Хосты, Кудепсты и Мзымты. Концентрации биогенных соединений определялись спектрофотометрическими методами, а макрокомпонентов – методом капиллярного электрофореза. Распределение гидрохимических характеристик вод соответствует классической картине для системы река – море. Химический состав рек относится к гидрокарбонатно-кальциевому типу, за исключением реки Мацесты, где состав смешанный. Наибольшие концентрации азотистых соединений зафиксированы в реках Мацесте и Кудепсте, фосфатов – в реке Сочи. Для реки Кудепсты характерны anomalously высокие значения общей щелочности. Для всех измеренных биогенных соединений превышение предельно допустимых концентраций для хозяйственно-бытового водопользования не зафиксировано.

Выводы. Химический состав воды в устьях исследуемых рек формируется под совместным влиянием природных и антропогенных факторов. Для реки Мацесты ключевым природным фактором является разгрузка минеральных подземных вод, а антропогенным – сброс сточных вод. Сочетание этих факторов и перекрытие устья привели к развитию процессов эвтрофикации. Для реки Кудепсты высокое фоновое значение щелочности имеет природное происхождение, однако повышенные концентрации биогенных элементов (азота и фосфора) связаны с активной строительной деятельностью в районе устья.

Ключевые слова: устьевая область, Черное море, Большой Сочи, антропогенное воздействие, химический состав воды, биогенные элементы, гидрохимический состав, макрокомпоненты

Благодарности: исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда № 24-27-20125, <https://rscf.ru/project/24-27-20125/>.

Для цитирования: Моисеева Ю. А., Пургина Д. В., Поливанова Т. К. Особенности химического состава вод устьевых областей рек Большого Сочи, северо-восточная часть Черного моря // Морской гидрофизический журнал. 2025. Т. 41, № 5. С. 631–645. EDN GDHODM.

Features of Water Chemical Composition in the River Mouths of the Bolshoi Sochi Region, North-Eastern Part of the Black Sea

Yu. A. Moiseeva ✉, D. V. Purgina, T. K. Polivanova

Sirius University of Science and Technology, Federal Territory «Sirius», Russia

✉ jamoiseeva@mail.ru

Abstract

Purpose. The study is purposed at identifying the characteristic features of content of dissolved forms of macrocompounds and nutrients in the river estuarine areas of Bolshoi Sochi (Sochi, Matsesta, Khosta, Kudepsta and Mzymta).

Methods and Results. The surface water samples were taken in the river estuaries of Sochi, Matsesta, Khosta, Kudepsta and Mzymta rivers in early November during the autumn-winter flood season. The concentrations of nutrient compounds were determined by the spectrophotometric methods and those of macrocompounds – by the capillary electrophoresis one. Distribution of water hydrochemical characteristics corresponds to the classical pattern typical of the river-sea system. Chemical composition of water in the rivers is of the hydrocarbonate-calcium type, except for the Matsesta River where the composition is mixed. The highest concentrations of nitrogen compounds were revealed in the rivers Matsesta and Kudepsta, and those of phosphates – in the Sochi River. The Kudepsta River water is characterized by the abnormally high values of total alkalinity. As for the domestic water use, the measurements of nutrient compounds have shown no excess of their maximum permissible concentrations.

Conclusions. Water chemical composition in the river mouths under study is conditioned by the impact of natural and anthropogenic factors. For the Matsesta River, the key natural factor is the discharge of mineral groundwater, whereas the anthropogenic factor is the wastewater discharge. The combination of these factors and the mouth overlap resulted in the development of eutrophication processes. For the Kudepsta River, the high background alkalinity value is of natural origin, but the increased concentrations of nutrients (nitrogen and phosphorus) are associated with intensive construction activities in the mouth area.

Keywords: mouth area, Black Sea, Bolshoi Sochi, anthropogenic impact, chemical composition of water, nutrients, hydrochemical composition, macrocomponents

Acknowledgements: The study was carried out with support of the Russian Science Foundation grant No. 24-27-20125, <https://rscf.ru/project/24-27-20125/>.

For citation: Moiseeva, Yu.A., Purgina, D.V. and Polivanova, T.K., 2025. Features of Water Chemical Composition in the River Mouths of the Bolshoi Sochi Region, North-Eastern Part of the Black Sea. *Physical Oceanography*, 32(5), pp. 643-656.

Введение

Устьевые области рек представляют собой уникальные физико-географические объекты со специфической геоморфологией, геологическим строением и гидрологическим режимом, формирующиеся под комплексным влиянием физических, химических и биологических процессов [1–3]. Для этих зон характерна высокая пространственно-временная изменчивость интенсивности и направленности происходящих процессов [4–6]. В связи с этим одной из актуальных научных задач является изучение транспорта и трансформации стока растворенных веществ в области смешения речных и морских вод как основного этапа миграции химических элементов в глобальном гидрологическом цикле [1, 2, 7–14]. Особая значимость этих зон также обусловлена их важной ролью в социально-экономическом развитии прибрежных территорий [3],

в том числе для Черноморского региона, так как Черное море и, в частности, побережье Большого Сочи – важный объект природного и рекреационного значения. В настоящее время проблема изучения экологического состояния прибрежных территорий Черного моря приобретает особую актуальность в связи с растущим потоком туристов и активным развитием инфраструктуры вдоль береговых линий и на водосборах рек, впадающих в Черное море.

До недавнего времени (в 2006–2014 гг.) комплексные исследования пространства материкового речного стока в Черное море выполнялись ежегодно для всего сектора российского побережья Черного моря [2, 10–12, 15, 16], в том числе в районах впадения исследуемых рек. Однако эти работы проводились преимущественно в морской акватории и не включали речные воды. За последние 10 лет исследования в этом районе сильно сократились. В настоящее время имеются лишь единичные работы, посвященные изучению химического состава р. Мзымты и Сочи [17, 18] и устьевых зон малых и средних рек северо-восточной части Черного моря, основанные на данных прошлых лет [14]. На фоне растущей антропогенной нагрузки приобретает особую важность учет происходящих климатических изменений, проявляющихся в увеличении числа экстремальных погодных явлений, таких как периоды сильной жары, засухи, интенсивные ливневые дожди. Эти факторы непосредственно влияют на сток рек и вынос веществ в море. В связи с этим представляется необходимым проводить исследования по изучению химического состава вод в различные сезоны года.

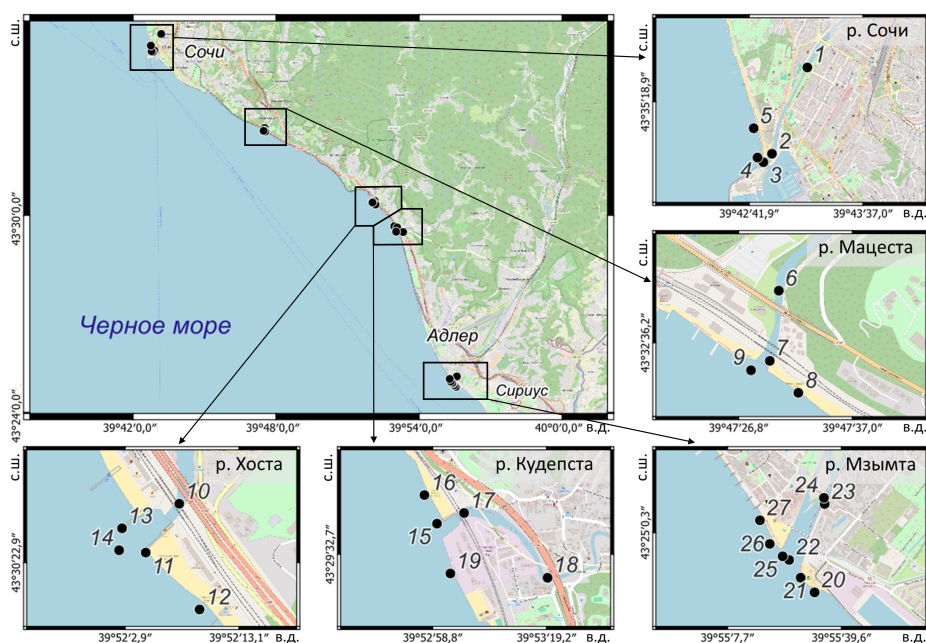
Уникальность Черного моря состоит в том, что оно представляет собой замкнутую морскую акваторию, испытывающую значительное влияние пресноводного материкового стока объемом 350 км^3 в год [2, 10, 12]. Это обуславливает его низкую соленость (18–20 ‰). Основной объем стока (более 80 %) черноморского побережья обеспечивается крупными реками, однако на территории России речной сток в Черное море формируют малые и средние реки [2, 10, 12, 19]. Наиболее крупные из них – р. Шахе ($1,2 \text{ км}^3$) и Мзымта ($1,6 \text{ км}^3$).

Наибольший объем стока рек северо-восточной части Черного моря (более 80 %) приходится на зимне-весенний период из-за преобладания дождевых паводков в питании рек. Однако для крупных рек, берущих начало на склонах Кавказского хребта, таких как р. Мзымта, характерно весенне-летнее половодье (50–70 % общего годового стока) и устойчивая зимняя межень [19]. Для большинства рек Большого Сочи (кроме р. Мзымты) наибольший сток наблюдается в осенне-зимний период вследствие преобладания дождевого питания в этих реках и значительно меньших площадей водосбора [10, 19]. Хотя вклад малых и средних рек в общий приток пресной воды в Черное море незначителен, их влияние на экосистему моря в целом может быть существенным. Эти водотоки способны существенно изменять гидрохимическую структуру вод и влиять на перенос веществ в прибрежных районах [9–14, 20]. Стоит отметить также, что реки восточной части черноморского побережья различаются по химическому составу вследствие особенностей геоморфологических характеристик (строение русла, состав дренирующих пород), а также наличия дополнительных источников питания (подземные воды, сброс сточных вод).

В связи с этим целью данного исследования является определение характерных особенностей пространственного содержания растворенных форм макрокомпонентов и биогенных элементов в устьевых областях рек Большого Сочи (Сочи, Мацеста, Хоста, Кудепста и Мзымта).

Материалы и методы исследования

Изучение химического состава вод в устьевых областях р. Мзымты, Хосты, Кудепсты, Мацесты, Сочи и прилегающих прибрежных морских вод было выполнено на основе материалов, полученных в ходе отбора проб поверхностных вод в начале ноября в период осенне-зимних паводков (рис. 1).



Р и с. 1. Карта-схема расположения точек отбора проб устьевых областей рек Большого Сочи
F i g. 1. Map of sampling point locations in river mouths of the Bolshoi Sochi region

Пробы отбирались в соответствии с ГОСТ 31861–2012 в 1,5-литровые бутылки для определения содержания биогенных соединений (Si , PO_4^{3-} , NO_2^- , NO_3^- , NH_4^+) и общей щелочности. Все пробы воды были отфильтрованы через мембранный фильтр 0,45 мкм. Измерения pH выполнялись полевым pH-метром *HM Digital PH-200*, а также дополнительно в стационарной лаборатории на pH-метре *Metrohm 913* по методике производителя с применением трех буферных растворов (4,01; 7,00; 10,01). На месте также измерялись окислительно-восстановительный потенциал *Eh*, *TDS* (*Total Dissolved Solids*) и температура *T* с помощью портативных влагозащищенных pH/EC/TDS-метра *HI991300* и ОВП-метра *HM Digital ORP-200*. Измерения растворенного кислорода были выполнены с помощью портативного датчика кислорода с точностью 0,01 мг/л.

Определение общей щелочности проводилось в стационарной лаборатории при 20 °С с контролем температуры потенциометрическим методом прямого титрования ¹.

Содержание биогенных соединений определялось спектрофотометрическими методами в течение нескольких часов после отбора проб ^{2, 3}. Азот аммонийный фиксировался непосредственно при отборе с последующим хранением в темном месте по методу Сэджи – Солорзано, основанному на образовании фенол-гипохлоритного комплекса [21] (предел обнаружения (ПО) 0,18 мкг/л). Нитратный азот определялся методом восстановления нитратов на омедненном кадмиевом восстановителе до нитритов с последующим фотометрическим определением образующихся нитритов (ПО 0,62 мкг/л). Анализ нитритов проводился с использованием единого цветного реактива на основе сульфаниламида и N-(1-нафтил)-этилендиамина дигидрохлорида (ПО 0,14 мкг/л). Содержание фосфатов определялось по реакции образования комплексной фосфорномолибденовой гетерополиокислоты (ПО 0,95 мкг/л), а растворенного кремния – методом Королева с образованием голубого кремнемолибденового комплекса (ПО 2,8 мкг/л). Точность методов измерения варьируется от 2,5 до 10 % в зависимости от определяемого элемента и его концентрации. В работе представлены концентрации биогенных элементов в форме $P-PO_4^{3-}$, $N-NO_2^-$, $N-NO_3^-$, $N-NH_4^+$, рассчитанные из концентраций соединений.

Концентрации макрокомпонентов (Ca^{2+} , Mg^{2+} , Na^+ , K^+ , SO_4^{2-} , Cl^-) определялись методом капиллярного электрофореза на анализаторе «Капель-205» в соответствии с методиками ПНД Ф 14.1:2:3:4.282-18 (М 01-58-2018) и ПНДФ 14.1:2:4.167-2000. Общая минерализация вод рассчитывалась как сумма концентраций основных ионов.

Результаты

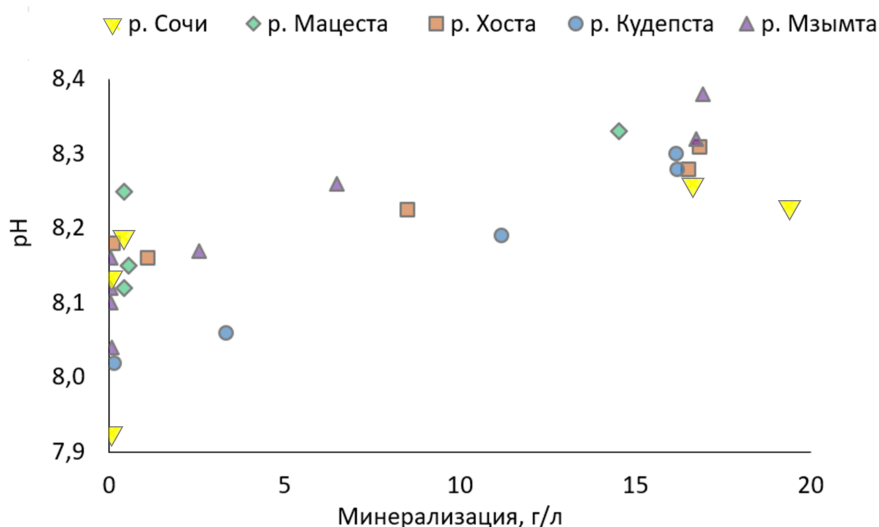
Гидрохимические параметры вод

Температура вод в устьевых областях исследуемых рек в ноябре повышалась по направлению к морю. Для р. Сочи температурный диапазон составлял 11,5–18,7 °С, для р. Мацесты и Хосты – 14,4–18,2 °С, для р. Кудепсты и Мзымты – 12,5–17,4 и 9,7–17,5 °С соответственно. Наблюдаемое распределение температур свидетельствует о смешении более холодных пресных вод с теплыми морскими, при этом наибольший температурный градиент наблюдался для р. Сочи и Мзымты. Величина рН для всех исследуемых устьевых областей также увеличивалась по направлению к морю (рис. 2, табл. 1).

¹ *Dickson A. G., Sabine C. L., Christian J. R.* Guide to best practices for ocean CO₂ measurements. Sidney, Canada : North Pacific Marine Science Organization, 2007. 191 p. (PICES Special Publication 3 ; IOOSS Report № 8).

² Руководство по химическому анализу морских и пресных вод при экологическом мониторинге рыбохозяйственных водоемов и перспективных для промысла районов Мирового океана / Под ред. В. В. Сапожникова. Москва : ВНИРО, 2003. 202 с.

³ *Parsons T. R., Maita Y., Lalli C. M.* A Manual of Chemical and Biological Methods for Seawater Analysis. Oxford ; New York : Pergamon Press, 1984. 173 p.



Р и с. 2. Зависимость pH от минерализации вод в устьевых областях рек Большого Сочи
F i g. 2. Dependence of pH on water mineralization in river mouths of the Bolshoi Sochi region

Т а б л и ц а 1
 T a b l e 1

**Гидрохимические параметры вод в устьевых областях
 рек Большого Сочи**
**Hydrochemical parameters of waters in river mouth areas
 of the Bolshoi Sochi region**

Название реки / Name of the river	pH	<i>Alk</i> , мг-экв/л / <i>Alk</i> , mg-eq/L	O ₂ , %
Сочи / Sochi	<u>7.93–8.26</u> 8,15	<u>2.18–3.36</u> 2,65	<u>100.8–121.5</u> 109,6
Мацеста / Matsesta	<u>8.12–8.33</u> 8,21	<u>3.43–3.67</u> 3,60	<u>120.0–128.4</u> 123,3
Хоста / Khosta	<u>8.16–8.31</u> 8,23	<u>3.11–3.37</u> 3,26	<u>119.6–125.4</u> 122,4
Кудепста / Kudepsta	<u>8.02–8.30</u> 8,17	<u>3.38–4.50</u> 3,84	<u>91.7–100.2</u> 97,0
Мзымта / Mzymta	<u>8.04–8.38</u> 8,19	<u>1.60–3.45</u> 2,21	<u>86.3–108.3</u> 100,0

П р и м е ч а н и е. В числителе указан диапазон значений минимум – максимум, в знаменателе – среднее.

N o t e: The numerator indicates the range of minimum-maximum values, the denominator – the average.

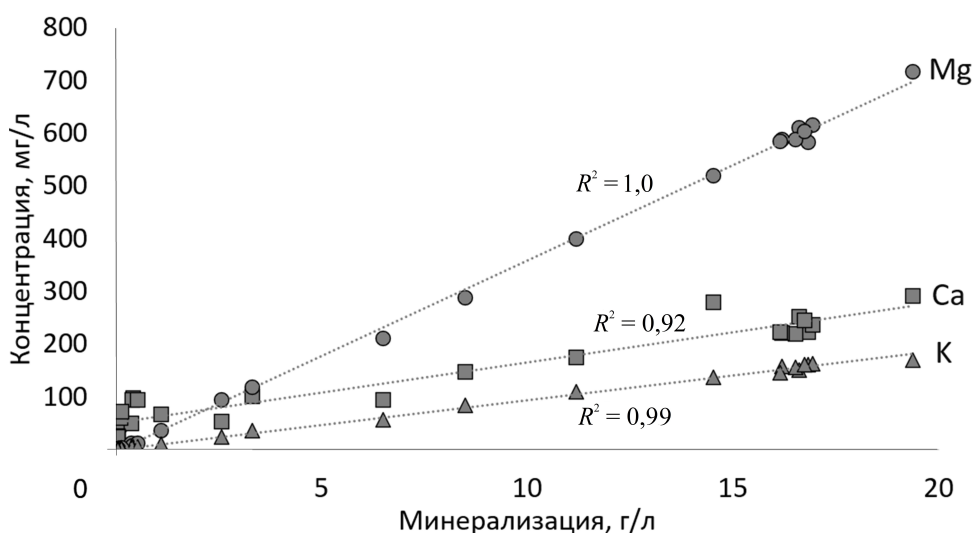
Значения Eh демонстрируют классический для зон смешения река – море характер распределения, аналогичный поведению величины pH. Относительно низкие значения Eh были зафиксированы в р. Сочи и Мацесте 30–71 и 38–87 мВ соответственно, для р. Хосты, Кудепсты и Мзымты диапазон значений составлял 64–132 мВ.

Распределение общей щелочности в р. Мзымте и Сочи характеризуется увеличением в направлении от рек к морю, в устьевых областях р. Хосты и Мацесты значения колеблются в незначительном диапазоне (табл. 1). В р. Кудепсте значения щелочности достигают 4,5 мг-экв/л и уменьшаются при смешении с морскими водами. При этом стоит отметить, что самые низкие значения общей щелочности (табл. 1) среди исследуемых рек выявлены в устьевой области р. Мзымты.

В период исследования насыщение вод кислородом в устьевых областях рек изменялось в пределах 86,3–128,4 % (табл. 1). Абсолютные концентрации растворенного кислорода варьировались в диапазоне от 8,41 до 11,39 мг/л. Наибольшие значения растворенного кислорода были выявлены в устьевых областях р. Мацесты (10,65–11,39 мг/л) и Хосты (10,61–10,97 мг/л).

Общий химический состав

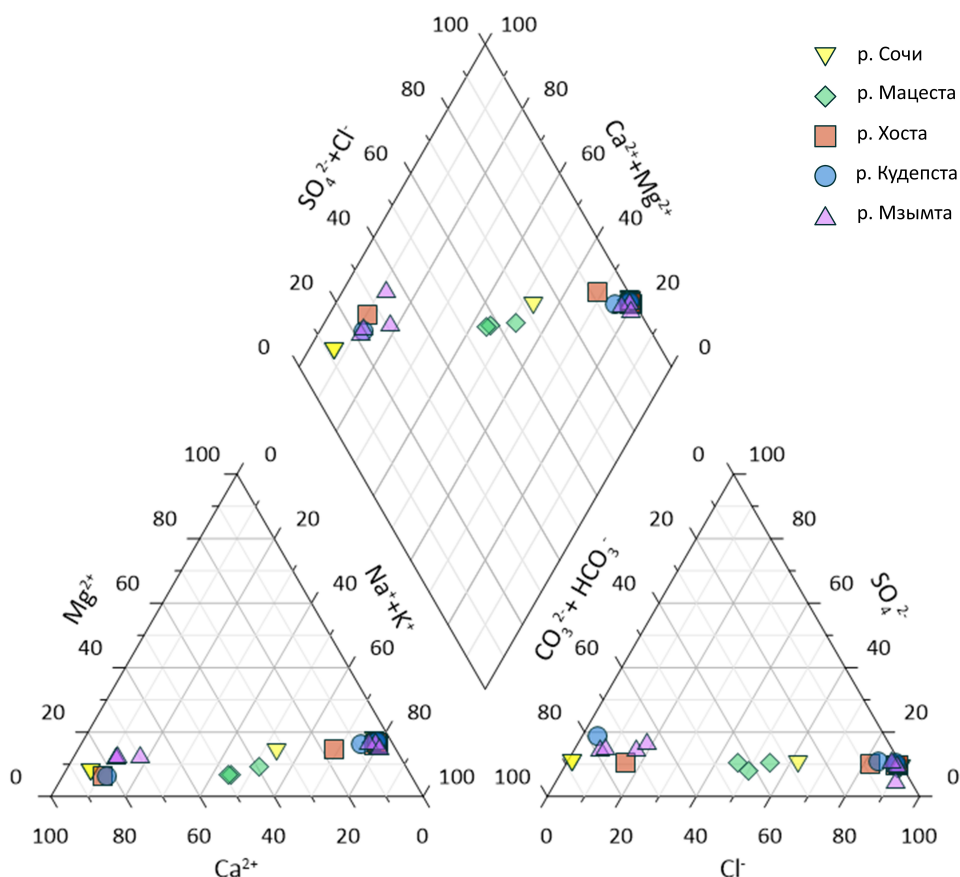
Распределение элементов основного состава вод при смешении речных и морских вод в большинстве случаев имеет консервативный характер [1, 13]. В данной работе такие элементы, как Ca^{2+} , Mg^{2+} , и K^+ (рис. 3), также демонстрируют консервативное поведение на всех устьевых участках рек.



Р и с. 3. Зависимость концентраций Ca, Mg и K от минерализации вод в устьевых областях рек Большого Сочи

F i g. 3. Dependence of Ca, Mg and K concentrations on water mineralization in river mouths of the Bolshoi Sochi region

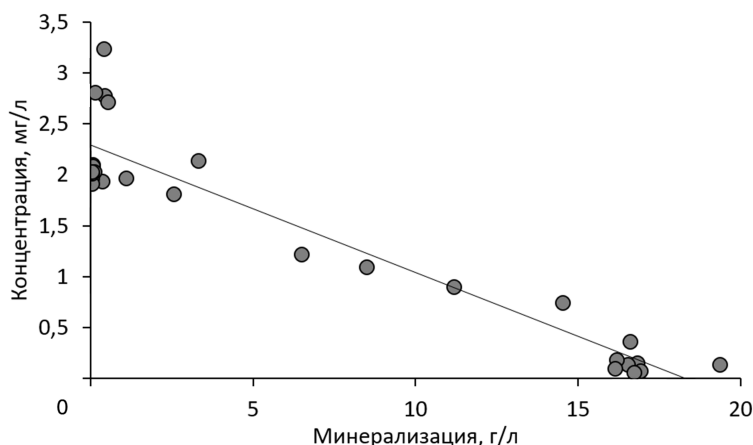
Воды прибрежной зоны Черного моря характеризуются хлоридно-натриевым составом, а речные – гидрокарбонатно-кальциевым. Исключение составляют воды устьевой области р. Мацесты, которые относятся к гидрокарбонатно-хлоридному натриево-кальциевому типу (рис. 4).



Р и с. 4. Химический состав вод в устьевых областях рек Большого Сочи на диаграмме Пайпера
F i g. 4. Chemical composition of waters in river mouths of the Bolshoi Sochi region at the Piper diagram

Биогенные соединения

В переходной зоне река – море на распределение биогенных элементов существенное влияние могут оказывать химические и биологические процессы самой речной системы (сорбция, десорбция, коагуляция и флокуляция коллоидов и др.), что обуславливает их неконсервативное поведение [1, 13]. В отличие от других биогенных элементов, изменение концентрации кремния часто служит индикатором разбавления морских вод речными. В данном исследовании это подтверждается линейной зависимостью между концентрацией Si и минерализацией вод для всех исследуемых рек ($R^2 = 0,89$, $p < 0,05$) (рис. 5). Наибольшие концентрации Si были зафиксированы в устьевой области р. Мацесты (табл. 2).



Р и с. 5. Зависимость содержания кремния от минерализации в устьевых областях рек Большого Сочи
Fig. 5. Dependence of silicon content on water mineralization in river mouths of the Bolshoi Sochi region

Т а б л и ц а 2
 Table 2

**Концентрации биогенных элементов в устьевых областях рек
 Большого Сочи**
Concentrations of nutrients in river mouth areas of the Bolshoi Sochi region

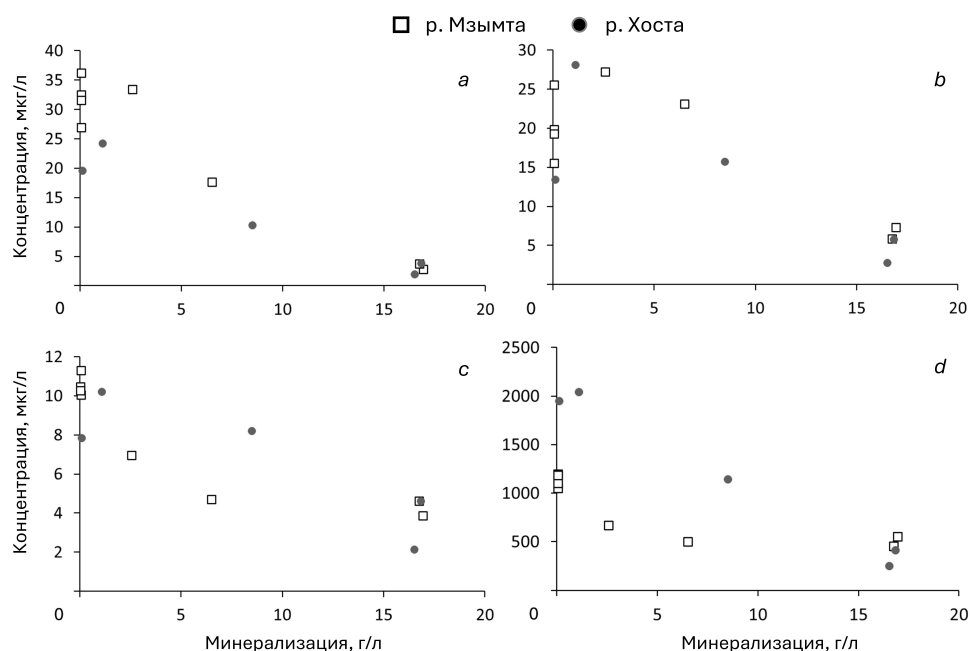
Название реки / Name of the river	Si, мг/л / Si, mg/L	P-PO ₄ ³⁻ / P-PO ₄ ³⁻	N-NO ₂ ⁻ / N-NO ₂ ⁻	N-NO ₃ ⁻ / N-NO ₃ ⁻	N-NH ₄ ⁺ / N-NH ₄ ⁺
		мкг/л / µg/L			
Сочи / Sochi	<u>0,13–2,09</u>	<u>9,1–24,2</u>	<u>0,7–4,9</u>	<u>65,7–465,1</u>	<u>3,9–38,6</u>
	1,32	17,5	3,0	297,8	25,5
Мацеста / Matsesta	<u>0,74–3,24</u>	<u>6,1–10,9</u>	<u>4,1–8,2</u>	<u>170,5–821,4</u>	<u>22,2–101,3</u>
	2,37	8,5	7,0	604,4	78,0
Хоста / Khosta	<u>0,13–2,03</u>	<u>0,6–7,9</u>	<u>0,6–3,1</u>	<u>56,5–460,5</u>	<u>2,1–21,8</u>
	1,07	3,9	2,0	261,4	10,2
Кудепста / Kudepsta	<u>0,10–2,81</u>	<u>0,3–22,4</u>	<u>1,0–10,9</u>	<u>53,6–863,9</u>	<u>3,1–128,3</u>
	1,22	10,5	5,1	414,1	64,6
Мзымта / Mzymta	<u>0,06–2,03</u>	<u>0,9–11,8</u>	<u>1,2–3,5</u>	<u>102,2–270,3</u>	<u>4,6–21,2</u>
	1,38	7,5	2,4	189,8	14,0

Пр и м е ч а н и е. В числителе указан диапазон значений минимум – максимум, в знаменателе – среднее.

Note: The numerator indicates the range of minimum-maximum values, the denominator – the average.

Содержание фосфатов в поверхностных водах для всех исследуемых устьевых областей рек Большого Сочи, кроме р. Мацесты, уменьшается по направлению от реки к морю. В диапазоне минерализации от 1 до 4 г/л наблюдается увеличение концентраций, после чего при дальнейшем росте минерализации происходит их резкое уменьшение (рис. 6). Для р. Мацесты содержание фосфатов в морской части (при минерализации 14,1 г/л) и в устье превышает их содержание в реке. Наибольшие концентрации фосфатов характерны для

р. Сочи и Кудепсты, а наименьшие – для р. Хосты (табл. 2). Распределение аммонийного азота демонстрирует сходную картину с фосфатами для всех устьевых областей исследуемых рек (рис. 6).



Р и с. 6. Распределение концентраций фосфатов (а), аммонийного азота (b), нитритов (с) и нитратов (d) в зависимости от минерализации устьевых областей и прибрежных вод р. Мзымты и Хосты

Fig. 6. Distribution of the phosphate (a), ammonium nitrogen (b), nitrite (c) and nitrate (d) concentrations depending on water mineralization in the Mzymta and Khosta rivers' estuaries and coastal waters

Распределение нитритов и нитратов имеет различный характер. Например, в устьевых областях р. Сочи и Кудепсты наблюдается постепенное уменьшение их концентраций по направлению к морю, а для р. Мзымты характерно резкое снижение содержания на начальном этапе смешения вод с последующей стабилизацией при минерализации 8 г/л и выше (рис. 6). Наибольшие концентрации всех растворенных форм азота (NH_4^+ , NO_2^- , NO_3^-) зафиксированы в р. Мацесте (табл. 2).

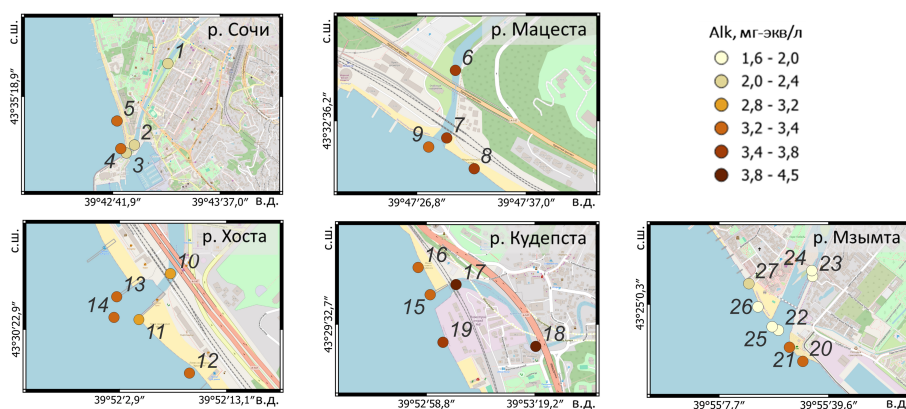
Обсуждение

Гидрокарбонатно-кальциевый состав вод рек Большого Сочи в нижнем течении характерен для данной природно-климатической зоны [17, 18]. По минерализации практически все реки относятся к ультрапресным (0,05–0,15 г/л). Исключение составляет р. Мацеста, для которой характерен смешанный химический тип вод с минерализацией (0,44–0,55 г/л). Это обусловлено участием в ее питании подземных минеральных вод (сульфидного состава)⁴, что также приводит к увеличению минерализации вод и повышению содержания сульфатов.

⁴ Бутюков Н. А. Перспективы использования минеральных вод на курорте Сочи. Saarbrücken, Germany : Lambert Academic Publishing, 2016. 92 p.

Распределение общей щелочности для зоны смешения река – море в районе исследования имеет классическую картину с увеличением значений от рек к морю. В р. Кудепсте зафиксированы наибольшие значения общей щелочности среди исследуемых рек (рис. 7), что согласуется с данными опубликованных работ [8, 10–12]. Такие высокие показатели щелочности связаны с геологическими особенностями водосбора реки, который сложен преимущественно карбонатными породами и включает карстовые пещеры в верхнем течении, из которых вода поступает в реку с дождевыми паводками. Сходные геологические условия характерны и для р. Хосты, но значения общей щелочности немного ниже, что объясняется большей скоростью потока реки и, соответственно, меньшим временем взаимодействия воды с горными породами⁵.

Наименьшие значения общей щелочности отмечены в р. Мзымте (рис. 7), что также подтверждается литературными данными [8, 10–12, 14]. Это обусловлено ледниковым питанием реки, особенностями геологического строения ее бассейна, сложенного преимущественно магматическими и метаморфическими породами. Речной сток Мзымты, характеризующийся низкой общей щелочностью, способствует снижению концентрации карбонатов в прибрежной зоне Черного моря. При этом данный показатель может служить интегральным индикатором для отслеживания распространения речного шлейфа Мзымты на большие расстояния в морской акватории.

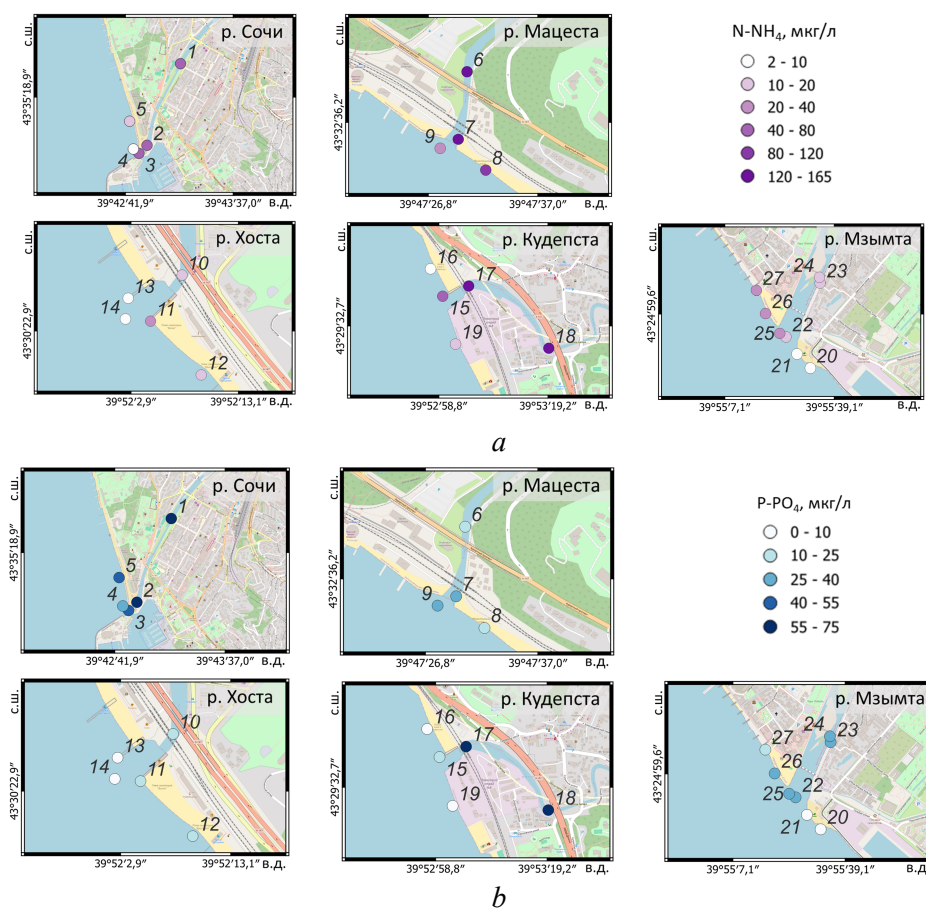


Р и с. 7. Распределение общей щелочности в устьевых областях рек Большого Сочи
F i g. 7. Distribution of total alkalinity values in river mouths of the Bolshoi Sochi region

В устьевых зонах исследуемых рек выявлено повышенное содержание растворенного кислорода в зоне смешения речных вод с морскими (при минерализации 1,1–8,5 г/л) по сравнению с речными водами. Наибольшая разница значений наблюдалась в устьевой области р. Сочи – 16,65 % насыщения кислородом, а для р. Хосты, Кудепсты и Мзымты этот показатель не превышал 5 % насыщения. Относительный рост концентрации растворенного кислорода в зонах смешения можно объяснить формированием областей с высокой биологической продуктивностью вод, обусловленной поступлением биогенных веществ с речными водами [2, 10, 12]. Относительно невысокая насыщенность вод кислородом (менее 100 %) в р. Кудепсте, скорее всего, связана с преобладанием процессов окисления органического вещества над продукционными процессами.

⁵ Шварцев С. Л. Общая гидрогеология. Москва : Альянс, 2012. 600 с.
 МОРСКОЙ ГИДРОФИЗИЧЕСКИЙ ЖУРНАЛ том 41 № 5 2025

Содержание растворенного кремния служит классическим индикатором влияния речного стока на химический состав морской воды, что подтверждается результатами исследований в устьевых областях рек Большого Сочи. Наибольшее содержание растворенного кремния (2,8–3,2 мг/л), выявленное в устьевой области р. Мацесты, вероятно, обусловлено ее подземным питанием термальными водами в сочетании со сбросом сточных вод в ее устьевом створе. В отличие от других исследуемых рек, таких как Сочи и Мзымта, р. Мацеста имеет достаточно малое количество притоков, что ограничивает процессы разбавления и влияет на ее химический состав. Термальные воды с повышенной температурой и минерализацией, в свою очередь, способствуют интенсивному растворению кремния из горных пород вместе с другими элементами (кальцием, магнием, йодом, бромом и др.) ⁶ [22].



Р и с. 8. Содержание растворенных аммонийного азота (а) и фосфора (b) в устьевых областях рек Большого Сочи

Fig. 8. Content of dissolved ammonium nitrogen (a) and phosphorus (b) in river mouths of the Bolshoi Sochi region

Увеличение содержания фосфатов и аммонийного азота в зоне смешения (1–4 г/л) по сравнению с речными и морскими водами, вероятно, связано с реминерализацией органического вещества в донных отложениях, которые взмучиваются в зоне смешения, что приводит к дополнительному поступлению биогенных элементов в воду. Интенсивность этого процесса зависит от скорости потока и количества осаждающегося взвешенного вещества. Повышенные концентрации фосфатов в р. Сочи и Кудепсте (рис. 8, *b*) и азота аммонийного в р. Мацесте и Кудепсте – в 3–5 раз выше, чем других реках (рис. 8, *a*), и, соответственно, более высокие содержания нитритов и нитратов (в 1,5–2 раза) свидетельствуют о локальном загрязнении этих рек. Это подтверждается фактами сброса сточных вод в реки и в отдельных случаях низкой скоростью течения в устьевой зоне. Например, в устье р. Мацесты часто формируется разделительная прибрежная коса между устьем и морскими водами, создающая благоприятные условия для эвтрофикации. В нижнем течении р. Кудепсты интенсивные строительные работы по бетонированию оснований искусственных сооружений новой транспортной развязки, вероятно, привели к разрушению почвенного слоя, который, попадая в реку, может способствовать увеличению в ней концентрации растворенных форм азота и фосфора.

Несмотря на то что в р. Сочи и Кудепсте концентрации фосфатов значительно выше, чем в других реках, они не превышают предельно допустимых концентраций (ПДК) для вод хозяйственно-бытового назначения согласно СанПиН 2.1.4.1074-01. Превышений ПДК других биогенных соединений также не было выявлено.

Сложный характер распределения биогенных соединений может объясняться их вовлечением в биологические процессы и переходом во взвешенные формы [1]. Можно также отметить, сходный механизм транспорта и трансформации растворенных форм азота и фосфора в устьевых областях р. Хосты и Кудепсты, что подтверждается высокой линейной корреляцией ($R^2 = 0,98$ и $0,97$ соответственно, $p = 0,05$). Для остальных рек эта связь слабая или отсутствует ($p > 0,05$). Для всех рек, кроме Мзымты, установлена линейная зависимость между концентрациями растворенных кремния и различных форм азота ($R^2 = 0,89 \dots 0,99$, $p = 0,05$). Корреляция между концентрациями кремния и фосфора прослеживается для р. Хосты, Кудепсты и Мзымты ($R^2 = 0,95$, $p = 0,05$). Слабая связь концентраций растворенного фосфора и кремния в р. Сочи и Мацесте может свидетельствовать о поступлении и транспорте фосфора не только с речным стоком в море, но и в результате взмучивания донных отложений в устьевой и прибрежной зонах.

Заключение

В результате гидрохимических исследований характерных особенностей распределения растворенных форм макрокомпонентов и биогенных соединений в устьевых областях рек Большого Сочи был установлен консервативный характер поведения ионов основного состава вод. Хотя для рек данной природно-климатической зоны характерен гидрокарбонатно-кальциевый состав, для р. Мацесты установлен гидрокарбонатно-хлоридный натриево-кальциевый тип вод, что обусловлено участием в ее питании подземных минеральных вод.

Гидрохимические характеристики вод (рН, Eh, *Alk*) имеют классическую картину распределения в зоне смешения речных и морских вод, за исключением повышенных значений общей щелочности в р. Кудепсте, связанных с особенностями геологического строения ее водосбора.

Распределение кремния имеет консервативный характер во всех устьевых областях. Наибольшие концентрации азотистых соединений зафиксированы в р. Мацесте и Кудепсте, фосфатов – в р. Сочи. При этом для всех биогенных соединений отсутствуют превышения ПДК для вод хозяйственно-бытового назначения.

Проведенное исследование показывает, что на химический состав вод в устьевых областях исследуемых рек влияют как природные, так и антропогенные факторы, часто действующие одновременно. Например, в формировании химического состава вод р. Мацесты участвуют сульфидные подземные воды, а в устьевом ее створе развиваются процессы эвтрофикации в результате сброса сточных вод и перекрытия устья. В водах р. Кудепсты, имеющей природные повышенные показатели общей щелочности, из-за строительных работ вблизи устьевой области фиксируются повышенные, по сравнению с другими реками, концентрации соединений азота и фосфора.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Гордеев В. В. Геохимия системы река-море. Москва : ИП Матушкина И.И., 2012. 452 с.
2. 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. 287–321. EDN THXBYZ. <https://doi.org/10.29006/978-5-91522-473-4.2018.287-322>
3. Михайлов В. Н. Гидрология устьев рек. Москва : Изд-во МГУ, 1998. 176 с.
4. Effects of salinity on nitrogen reduction pathways in estuarine wetland sediments / H. Zheng [et al.] // Marine Pollution Bulletin. 2024. Vol. 207. 116834. <https://doi.org/10.1016/j.marpolbul.2024.116834>
5. Variability of trace metals in coastal and estuary: Distribution, profile, and drivers / Harmesa [et al.] // Marine Pollution Bulletin. 2022. Vol. 174. 113173. <https://doi.org/10.1016/j.marpolbul.2021.113173>
6. Tornero V., Hanke G. Chemical contaminants entering the marine environment from sea-based sources: a review with a focus on European seas // Marine Pollution Bulletin. 2016. Vol. 112, iss. 1–2. P. 17–38. <https://doi.org/10.1016/j.marpolbul.2016.06.091>
7. Spatial, temporal, and vertical variability of nutrients in the Southeastern Black Sea / A. Alkan [et al.] // Chemosphere. 2022. Vol. 302. 34809. <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2022.134809>
8. Influence of small rivers runoff on the hydrochemical structure of coastal waters of the North-Eastern Black Sea / A. V. Kostyleva [et al.] // Coastal Engineering Practice. 2011. P. 286–297. EDN PELQBR. [https://doi.org/10.1061/41190\(422\)24](https://doi.org/10.1061/41190(422)24)
9. Pathways and mixing of the North Western river waters in the Black Sea / S. Miladinova [et al.] // Estuarine, Coastal and Shelf Science. 2020. Vol. 236. 106630. <https://doi.org/10.1016/j.ecss.2020.106630>
10. 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>
11. Костылева А. В. Распределение растворенного органического углерода в приустьевых районах Большого Сочи (северо-восточная часть Черного моря) // Океанология. 2015. Т. 55, № 2. С. 224–230. EDN TPWLVL. <https://doi.org/10.7868/S0030157415020082>
12. Маккавеев П. Н., Полухин А. А., Степанова С. В. Работы по изучению приустьевых областей малых и средних рек в прибрежной зоне российского сектора Черного моря // Экологическая безопасность прибрежной и шельфовой зон и комплексное использование ресурсов шельфа. 2013. № 27. С. 412–417. EDN VBFSJP.

13. *Савенко А. В.* Типы распределения растворенных форм химических элементов в устьевых областях рек // Вестник Московского университета. Серия 5. География. 2018. № 2. С. 53–59. EDN YUUDIK.
14. *Савенко А. В., Покровский О. С.* Трансформация макро- и микроэлементного состава стока растворенных веществ в устьях средних и малых рек Черноморского побережья России // Океанология. 2022. Т. 62, № 3. С. 380–402. EDN MJPAOV. <https://doi.org/10.31857/S003015742203011X>
15. *Гордеев В. В., Маккавеев Е. П., Коченкова А. И.* Тяжелые металлы в воде и взвеси в устьях рек и прибрежной зоне российской части Кавказского побережья Черного моря // Вода: химия и экология. 2015. № 11. С. 7–21. EDN WMFKPZ.
16. Оценка уровня техногенных загрязнений в прибрежной зоне Черного моря в районе Геленджика / В. К. Часовников [и др.] // Океанология. 2016. Т. 56, № 1. С. 76–80. EDN VIOSFX.
17. *Литвиненко Ю. С., Захарихина Л. В.* Геохимия и радиоэкология вод и донных отложений р. Мзымты черноморского побережья // Геохимия. 2022. Т. 67, № 4. С. 376–393. <https://doi.org/10.31857/S0016752522030049>
18. *Лесникова П. С.* Изменение макроэлементного состава речных вод в контрастных геологических условиях, река Сочи Черноморского побережья России // Вестник ВГУ. Серия: География. Геоэкология. 2023. № 3. С. 47–56. EDN GCSFZK. <https://doi.org/10.31857/S0016752522030049>
19. *Джаошвили Ш.* Реки Черного моря. Тбилиси, 2002. 58 с. (Технический отчет № 71). URL: http://www.eea.europa.eu/ru/publications/technical_report_2002_71/at_download/file (дата обращения: 20.09.2025).
20. *Ozseker K., Eruz C., Terzi Y.* Spatial distribution and ecological risk evaluation of toxic metals in the southern Black Sea coastal sediments // Marine Pollution Bulletin. 2022. Vol. 182. 114020. <https://doi.org/10.1016/j.marpolbul.2022.114020>
21. *Solorzano L.* Determination of ammonia in natural waters by the phenolhypochlorite method // Limnology Oceanography. 1969. Vol. 14, iss. 5. P. 799–801. <https://doi.org/10.4319/lo.1969.14.5.0799>
22. *Шварцев С. Л.* Гидрогеохимия зоны гипергенеза. Москва : Недра, 1998. 366 с.

Об авторах:

Монсеева Юлия Александровна, старший научный сотрудник, Международный научный центр в области экологии и вопросов изменения климата, Научно-технологический университет «Сириус» (354340, Российская Федерация, Краснодарский край, федеральная территория «Сириус», Олимпийский пр., д. 1), кандидат геолого-минералогических наук, **ORCID ID: 0000-0002-8166-1040**, **ResearcherID: AAA-8629-2022**, **Scopus Author ID: 57189492120**, **SPIN-код: 6060-2294**, jamoiseeva@mail.ru

Пургина Дарья Валерьевна, старший научный сотрудник, Международный научный центр в области экологии и вопросов изменения климата, Научно-технологический университет «Сириус» (354340, Российская Федерация, Краснодарский край, федеральная территория «Си-риус», Олимпийский пр., д. 1), кандидат геолого-минералогических наук, **ORCID ID: 0000-0001-7169-8264**, **ResearcherID: AAB-4866-2020**, **Scopus Author ID: 57189490353**, **SPIN-код: 6456-8220**, purgina.dv@talantiuspeh.ru

Поливанова Татьяна Константиновна, младший научный сотрудник, Международный научный центр в области экологии и вопросов изменения климата, Научно-технологический университет «Сириус» (354340, Российская Федерация, Краснодарский край, федеральная территория «Сириус», Олимпийский пр., д. 1), **ORCID ID: 0009-0001-2207-9552**, **ResearcherID: NAZ-6122-2025**, **Scopus Author ID: 58703938600**, bari.polivanova@gmail.com