

Гидрохимические особенности водосбора реки Мзымта

Юлия А. Моисеева¹, Дарья В. Пургина¹, Андрей С. Торопов², Ульяна В. Главная³, Пётр Т. Ситников⁴, Айгуль Ф. Шигапова⁵, Вероника В. Бояркина⁶, Андрей А. Гринько¹

¹Научно-технологический университет «Сириус», Федеральная территория «Сириус», Россия

²Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова, Москва, Россия

³Биотехнологический лицей № 21, Новосибирская область, Россия

⁴Академический лицей «Физико-техническая школа» им. Ж. И. Алфёрова, Санкт-Петербург, Россия

⁵Лицей-интернат для одаренных детей с углубленным изучением химии – филиал ФГБОУ ВО «Казанский национальный исследовательский технологический университет», Республика Татарстан, Россия

⁶Белоярская средняя общеобразовательная школа, Новосибирская область, Россия

Контактное лицо

Юлия А. Моисеева, кандидат геолого-минералогических наук, старший научный сотрудник, Международный научный центр в области экологии и вопросов изменения климата Научно-технологического университета «Сириус»; 354340 Россия, Федеральная территория «Сириус», Олимпийский пр-т, 1. Тел. +79138037501

Email moiseeva.ya@talantiuspeh.ru

ORCID <https://orcid.org/0000-0002-8166-1040>

Формат цитирования

Моисеева Ю.А., Пургина Д.В., Торопов А.С., Главная У.В., Ситников П.Т., Шигапова А.Ф., Бояркина В.В., Гринько А.А. Гидрохимические особенности водосбора реки Мзымта // Юг России: экология, развитие. 2025. Т.20, N 3. С. 218-230. DOI: 10.18470/1992-1098-2025-3-20

Получена 14 марта 2025 г.

Прошла рецензирование 16 июня 2025 г.

Принята 25 июля 2025 г.

Резюме

Химический состав рек определяется особенностями бассейна водосбора, климатическими условиями и антропогенной нагрузкой. Данное исследование посвящено выявлению основных природных и антропогенных факторов и закономерностей, обуславливающих формирование химического состава р. Мзымта и её притоков в среднем и нижнем течении. В статье представлены данные гидрохимических параметров, содержания биогенных соединений и микроэлементов, в том числе тяжелых металлов реки Мзымты и её притоков от места слияния р. Пслух с р. Мзымтой до впадения в Чёрное море. В результате было выявлено, что нижнее течение относительно среднего характеризуется более высокими концентрациями всех биогенных соединений. Была выделена группа микроэлементов (V, Al, Ti, Mn, Fe, Co, Cu, Pb и PЗЭ), концентрации которых имеют однонаправленные изменения по мере движения вод вниз по течению. Воды р. Пслух, р. Мзымта в зоне её слияния с рр. Пслух и Кепша, а также в зоне влияния сточных вод и устье р. Мзымта существенно обогащены микроэлементами относительно кларка речных вод. В целом, изменения в химическом составе р. Мзымта происходят под воздействие двух факторов: природного и антропогенного, а именно из-за различных геологических условий её основных притоков, режима и уклона реки в среднем и нижнем течении, а также из-за влияния строительных работ в руслах рек и сброса сточных вод.

Ключевые слова

Химический состав вод, микроэлементы, биогенные соединения, поверхностные воды, р. Мзымта, притоки.

Hydrochemical features of the Mzymta River catchment area

Yulia A. Moiseeva¹, Daria V. Purgina¹, Andrey S. Toropov², Ulyana V. Glavnaya³, Peter T. Sitnikov⁴, Aigul F. Shigapova⁵, Veronika V. Boyarkina⁶ and Andrey A. Grinko¹

¹Sirius University of Science and Technology, Federal Territory «Sirius», Russia

²Lomonosov Moscow State University, Moscow, Russia

³Biotechnological Lyceum No. 21, Novosibirsk Region, Russia

⁴Academic Lyceum, J. I. Alfeyorov Physico-Technical School, St. Petersburg, Russia

⁵Boarding Lyceum for Gifted Children with Advanced Study of Chemistry, Branch of Kazan National Research Technological University, Republic of Tatarstan, Russia

⁶Beloyarskaya Secondary General Education School, Novosibirsk Region, Russia

Principal contact

Yulia A. Moiseeva, Candidate of Geological and Mineralogical Sciences, Senior Researcher, International Research Centre for Ecology and Climate Change Issues, Sirius University of Science and Technology; 1 Olympiysky Ave, Sirius Federal Territory, Russia 354340.

Tel. +79138037501

Email moiseeva.ya@talantiuspeh.ru

ORCID <https://orcid.org/0000-0002-8166-1040>

How to cite this article

Moiseeva Yu.A., Purgina D.V., Toropov A.S., Glavnaya U.V., Sitnikov P.T., Shigapova A.F., Boyarkina V.V., Grinko A.A. Hydrochemical features of the Mzymta River catchment area. *South of Russia: ecology, development*. 2025; 20(3):218-230. (In Russ.) DOI: 10.18470/1992-1098-2025-3-20

Received 14 March 2025

Revised 16 June 2025

Accepted 25 July 2025

Abstract

The chemical composition of rivers is determined by catchment basin features, climatic conditions and anthropogenic influence. This study is devoted to the identification of the main natural and anthropogenic factors and patterns that determine the formation of the chemical composition of the Mzymta River and its tributaries in its middle and lower reaches. Data on hydrochemical parameters, content of biogenic compounds and trace elements, including heavy metals of the Mzymta River and its tributaries from the confluence of the Pslukh River with the Mzymta River to the confluence with the Black Sea, are presented. The result revealed that the lower reaches were characterised by higher concentrations of all nutrient compounds than the middle reaches. A group of trace elements (V, Al, Ti, Mn, Fe, Co, Cu, Pb and REE) whose concentrations have unidirectional changes as the waters move downstream has been identified. The waters of the Pslukh River and the Mzymta River in the area of its confluence with the Pslukh and Kepsha Rivers, as well as in the zone of influence of sewage and its estuary, are significantly enriched in trace elements relative to the median chemical constituents of river waters. In general, changes in the chemical composition of the Mzymta River are influenced by two factors, natural and anthropogenic, namely due to the different geological conditions of its main tributaries, the regime and gradient of the river in its middle and lower reaches and the impact of construction works in the river channels and wastewater discharge.

Key Words

Water chemistry, trace elements, biogenic compounds, surface water, Mzymta River, tributaries.

ВВЕДЕНИЕ

Изучение химического состава рек является важным инструментом для понимания как естественных, так и антропогенных процессов, влияющих на состояние водной экосистемы и происходящих геохимических процессов [1–10]. В свою очередь природно-климатические особенности региона (количество атмосферных осадков, температурный режим, тип почв и растительности) и конкретные условия водосбора (состав пород, геоморфологические особенности и др.) являются первоочередным фактором в формировании химического состава речных вод [11–13]. Антропогенное воздействие относится к косвенному фактору, но для некоторых регионов является определяющим в химическом составе и оценке качества вод [14–19]. Изучение химического состава рек имеет также важное значение с точки зрения влияния стока рек на прибрежные экосистемы, так как материковый сток является основным поставщиком взвешенных и растворенных веществ, биогенных элементов и тяжелых металлов в море [1; 4; 5; 7; 20].

Река Мзымта – одна из самых крупных и многоводных рек, впадающих в Чёрное море на территории России с площадью водосбора 885 км² и годовым объемом стока 1,6 км³ [3; 21]. На всем протяжении реки в неё впадают множество притоков (р. Пслух, р. Лаура, р. Чвижепсе, р. Кепша и др.), протекающие на территориях Кавказского государственного биосферного заповедника и Сочинского Национального парка. В пределах водосбора р. Мзымта имеются многочисленные выходы минеральных источников, в том числе на р. Чвижепсе, воды которого также изучались в данной работе. Характерной особенностью района исследования является неоднородность и контрастность слагающих его геологических пород. В целом для водосбора р. Мзымта характерно развитие сульфидного, полиметаллического (свинец, цинк, медь) и золоторудного оруденения, имеющих площадное распространение на десятках и сотнях квадратных километров [22]. Исследуемые речные воды подвержены активной и растущей антропогенной нагрузке (урбанизация территории, в том числе рост водопотребления, сброс сточных вод) и их химический состав, в том числе микроэлементный, служит интегральным показателем воздействия хозяйственной деятельности. В свою очередь изучение микроэлементного состава поверхностных вод в зависимости от факторов является актуальным направлением гидрохимических исследований.

Не смотря на уникальность объекта исследования как с точки зрения природных факторов, так и растущей антропогенной нагрузки опубликованные к настоящему времени материалы о химическом составе реки Мзымта и её устьевой области весьма ограничены и посвящены преимущественно изучению биогенных соединений прибрежной зоны [1; 3; 5; 20]. На сегодняшний день имеются единичные работы полного микроэлементного состава на всем течении реки [2] и в устьевой зоне [4]. С 2006 года до 2014 регулярно проводились экспедиционные исследования сотрудниками ИО РАН с целью изучения стока малых и средних рек на прибрежные воды Чёрного моря [20]. Ряд работ, посвящен подземным водам [23–24] и особенностям геологии водосбора реки Мзымты [21; 25].

Из опубликованных работ было установлено, что изменение химического состава вод реки Мзымты от истоков до устья определяется в основном химическим

составом её притоков, а в нижнем течении химический состав вод определяется, главным образом, интенсивностью антропогенного воздействия [3]. Однако подробного и полного представления о формировании химического состава реки Мзымты в опубликованных работах не приводится. В связи с этим целью данного исследования является актуализация данных и выявление основных природных и антропогенных факторов и закономерностей, обуславливающих формирование химического состава р. Мзымта и её притоков в среднем и нижнем течении.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Район исследования включает в себя среднее (т.1–8) и нижнее (т.9–14) течение р. Мзымта (рис. 1). Всего было отобрано 14 проб воды. Точки отбора проб были выбраны в зоне слияния реки Мзымты с её основными притоками (рр. Пслух, Чвижепсе, Лаура, Кепша), в том числе исследовались отдельно сами притоки, а также некоторые участки, условно подверженные антропогенному воздействию: в зоне влияния городской ливневой канализации (ГЛК) (т. 11–12) и вблизи базы отдыха (БО) около Ахштырского Каньона (т. 10). Здесь стоит также отметить, что в 300 м выше устья р. Кепша велись ремонтные работы опор моста, из-за которых воды сильно были взмучены и в зоне слияния с р. Мзымта наблюдалось большое количество взвеси. Отдельно также был изучен химический состав минерального источника, расположенного в водосборе самого крупного притока – р. Чвижепсе.

По типу водного режима река Мзымта относится к паводочному с ярко выраженным половодьем в теплый период года со средним годовым расходом 49,5 м³/с [24]. В верховьях реки Мзымты средний уклон реки составляет 34,6 ‰ и ширину русла 8 м, по мере движения вниз по течению к устью на участке после впадения р. Пслух уклон становится 30,5 ‰ (переход от верхнего к среднему течению), русло реки расширяется до 50–60 м и в районе между устьями рр. Чвижепсе и Кепша уклон падает до 7–8 ‰ с шириной русла 35 м. При выходе на имеретинскую низменность р. Мзымта течет по широкой долине и характеризуется многочисленными протоками, заполненными осередками и побочными [24].

На участке исследования согласно [22; 25] выделяют следующий состав горных пород, слагающих долину р. Мзымта: от места впадения р. Пслух (т.1–2) до Лауры (т.3) в основном, породы представлены юрскими аргиллитами с прослоями алевролитов, песчаников, сидеритов с конкрециями пиритов, редко пирокластические породы и лавы кислого, среднего и основного составов. В районе от места слияния с Мзымтой р. Чвижепсе (т. 5–6) до р. Кепша (т. 7–8) русло реки залегает в породах, представленных аргиллитами с прослоями песчаников, алевролитов, мергелей, известняками с прослоями мергелей, гравелитов и песчаников. В нижнем течении (т. 9–13) преимущественно в основании современных аллювиальных отложений залегают палеогеновые и неогеновые глины, мергелистые глины с алевролитами и песчаниками. В породах на территории водосбора, как уже говорилось выше, широко развиты зоны сульфидной минерализации (медь, золото, полиметаллы) [22; 25] и в среднем течении реки распространены субщелочные породы основного и среднего состава с редкометалльно-редкоземельным составом [21–22].

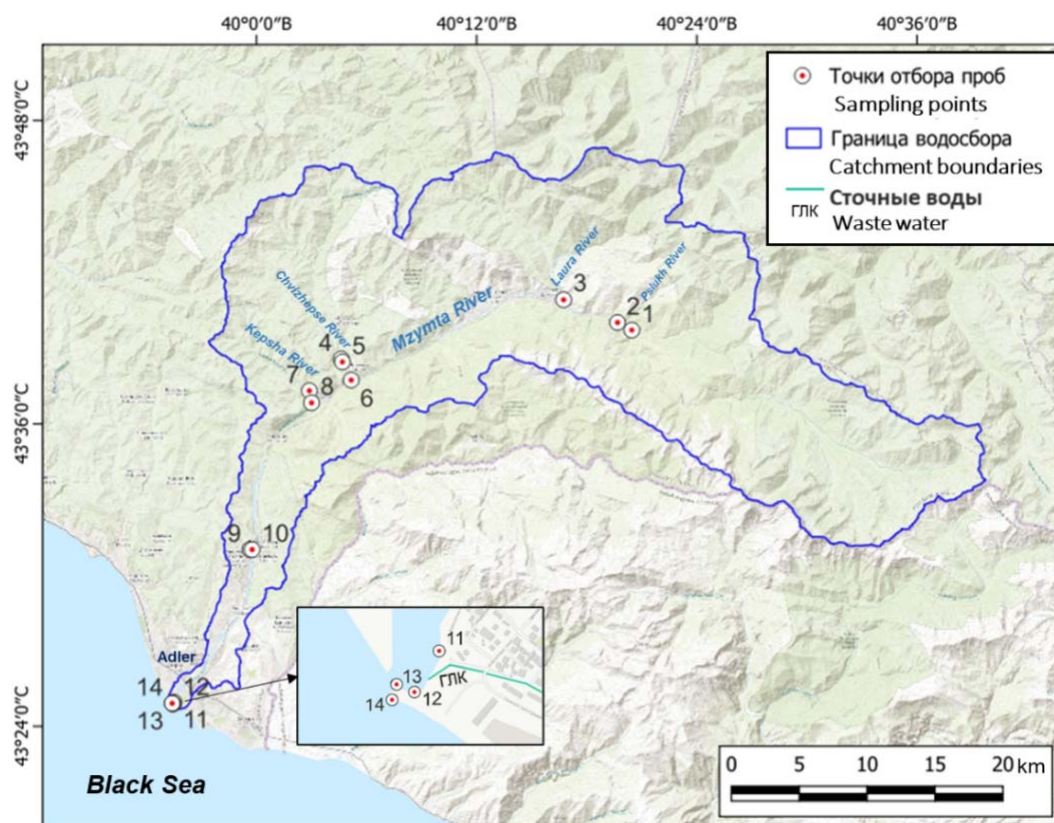


Рисунок 1. Карта – схема расположения точек отбора проб в водосборе р. Мзымта

Figure 1. Location map of sampling points in the Mzymta River catchment

Отбор проб осуществлялся в начале июля в сезон с наименьшим стоком реки в течении 3х дней в одинаковых погодных условиях. На месте определялись pH, Eh, TDS, с помощью портативных влагозащищенных pH/EC/TDS-метра HI991300 и ОВП метра HM Digital ORP-200, температура воды определялась температурным датчиком. Пробы отбирались в соответствии с ГОСТ 31861-2012 в 1.5 литровые бутылки для определения биогенных элементов (Si , PO_4 , NO_2 , NO_3), сульфатов и общей щелочности и в 50 мл пробирки фирмы Eppendorf для определения микроэлементного состава. Определение растворенного кислорода проводилось методом Винклера [28]. Общая щелочность (A_T) определялась в лаборатории методом обратного титрования [29; 30]. Измерения биогенных элементов проводились спектрофотометрическими методами в течение нескольких часов после отбора проб, азот аммонийный фиксировался сразу при отборе и хранился в темном месте [28–29]. Массовая концентрация сульфатов в водах проводилась турбидиметрическим методом [31], основанное на измерении интенсивности помутнения растворов при добавлении хлорида бария в кислой среде. Определение микроэлементного состава вод выполнялось масс-спектрометрическим методом с индуктивно-связанной плазмой (Plasma Quant MS Elite). Аномалии церия и европия был рассчитаны следующим образом: $\text{Log}((2\text{-Ce}/\text{Ce}_{\text{NASC}})/(\text{La}/\text{La}_{\text{NASC}}+\text{Pr}/\text{Pr}_{\text{NASC}}))$ и $\text{Eu}/\text{Eu}_{\text{NASC}} = \text{Log}((2\text{-Eu}/\text{Eu}_{\text{NASC}})/(\text{Sm}/\text{Sm}_{\text{NASC}}+\text{Gd}/\text{Gd}_{\text{NASC}}))$, соответственно.

ПОЛУЧЕННЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Гидрохимические параметры

В распределении гидрохимических показателей прослеживается четкая закономерность влияния притоков на изменения pH по мере движения водных масс вниз по течению реки Мзымты (табл. 1). На момент пробоотбора в

водосборе реки Мзымты не выявлено превышения предельно допустимых значений pH.

В пространственной динамике температура вод в среднем и нижнем течении р. Мзымты существенно различается (средние значения составили 14,2 и 20,2 °C, соответственно), не смотря на теплые притоки среднего течения (р. Чвижепсе и р. Кепша) холодные воды с верховьев Мзымты в меньшей степени подвергаются влиянию температурного режима её притоков в среднем течении, а из-за наименьшего уклона и широкого русла реки в низовьях вода быстрее прогревается и достигает более высоких значений. Величина A_T в р. Мзымта изменяется в пределах от 0,60 мг-экв/л до 1,46 мг-экв/л и подвержена пространственной изменчивости. Воды крупных притоков р. Мзымта – реки Пслух, Лаура, Чвижепсе системно встраиваются в речную систему водосбора без контрастных отличий. Исключением является р. Кепша, воды которой дренируют карбонатные породы и в нижнем своем течении становится щелочной с pH – 8,05 и насыщенной гидрокарбонатами A_T – 2,30 мг-экв/л (A_{HCO_3} – 2,26 мг-экв/л). Для подземных вод скважины Чвижепсе характерно высокое значение A_T (28,02 мг-экв/л), что определяется условиями их формирования.

Макрокомпонентный состав

Химический состав реки Мзымты вниз по течению сменяется с преобладания гидрокарбонат иона на сульфат и хлорид ионов, переходя от ультрапресных и пресных вод до солоноватых и соленых в прибрежной части Чёрного моря (рис. 2). Соответственно воды прибрежной зоны Черного моря характеризуется наибольшей степенью минерализации и представлены хлоридно-сульфатом натриевым составом. Притоки реки Мзымты по минерализации ультрапресные и по химическому составу

являются гидрокарбонатно-сульфатные кальциевые (магниево-кальциевые) – р. Пслух, р. Лаура и р. Кепша сульфатно-гидрокарбонатные кальциевые, р. Чвижепсе гидрокарбонатные кальциевые (магниево-кальциевые). Воды скважины Чвижепсе солоноватые и по химическому составу характеризуются как гидрокарбонатно-сульфатные

кальциевые (магниево-кальциевые) и являются мышьяковистыми (4,1 мг/л). Общая жесткость исследуемых вод изменяется в пределах от 0,5 (т.8) до 8,1 (т.11) мг-экв/л, исключая точки отбора в Чёрном море и скважине Чвижепсе.

Таблица 1. Основные характеристики вод р. Мзымта и её притоков

Table 1. Main water characteristics of the Mzymta River and its tributaries

№*	Место отбора Sampling point	С.Ш. N. lat.	В.Д. E. long.	Т, °С	рН, ед. рН, units	А _т , мг- экв/л А _т , mg-eq/l	Мин-ия, мг/л Mineralisat ion, mg/l
1	р. Пслух / Pslukh River	43°39'43"	40°20'28"	11,1	7,69	0,46	83,6
2	р. Пслух – р.Мзымта Pslukh River – Mzymta River	43°39'60"	40°19'39"	10,0	7,45	0,60	62,9
3	р. Лаура / Laura River	43°40'57"	40°16'44"	13,9	6,73	0,54	63,0
4	Скв. Чвижепсе Chvizhepse well	43°38'35"	40°4'37"	17,1	6,40	28,02	3166,8
5	р. Чвижепсе / Chvizhepse River	43°38'27"	40°4'39"	18,5	6,50	0,74	62,3
6	р. Чвижепсе – р. Мзымта Chvizhepse River – Mzymta River	43°37'45"	40°5'8"	18,1	6,88	0,86	97,7
7	р. Кепша / Kepscha River	43°37'18"	40°2'53"	17,5	8,05	2,30	241,2
8	р. Кепша – р.Мзымта Kepscha River – Mzymta River	43°36'49"	40°2'60"	12,6	7,70	0,60	57,2
9	Скв. Форелевое хозяйство Trout Farm well	43°31'1"	39°59'37"	11,7	7,40	1,66	188,5
10	р. Мзымта (БО Ахштырский Каньон) / Mzymta River (Akhshtyrsky Canyon)	43°31'3"	39°59'46"	16,1	7,43	0,68	100,9
11	р. Мзымта (60 м выше от сброса ГЛК) Mzymta River (60 m upstream of wastewater discharge)	43°24'57"	39°55'30"	24,2	8,25	1,10	1280,6
12	р. Мзымта (80 м ниже от сброса ГЛК) /Mzymta River (80 m downstream of wastewater discharge)	43°24'55"	39°55'25"	21,8	7,73	1,46	932,2
13	р. Мзымта – устье Mzymta River – estuary	43°24'57"	39°55'23"	18,6	7,83	0,74	316,8
14	Чёрное море (берег) Black Sea (shore)	43°24'56"	39°55'24"	24,6	8,19	2,02	18960,5

Примечание: * Номер точки отбора в соответствии с рис. 1.

Note: * Sampling point number in accordance with Fig. 1.

Биогенные соединения и растворенный кислород

Нижнее течение р. Мзымта относительно среднего характеризуется более высокими концентрациями всех биогенных соединений (табл. 2). Это обусловлено влиянием ГЛК и более высоким уровнем температур в нижнем течении, который возникает из-за меньшей скорости течения и широкого русла реки на этом участке. При этом, если рассматривать только воды р. Мзымта в местах слияния притоков и ограничивая зону влияния ГЛК, то концентрации только азотистых соединений выше в нижнем течении, чем в среднем, а содержание фосфатов и кремния приблизительно одинаковое. Повышенные концентрации азотистых соединений в нижнем течении и содержания азота аммонийного, превышающего ПДК до 3 раз, подтверждают влияние сточных вод. Концентрация растворенного кислорода на участке исследования изменялась в пределах от 0,00 мг/л (Скв. Чвижепсе) до 14,29 мг/л (р.Мзымта 50 м выше от сброса ГЛК). Непосредственно в самой реке Мзымте и её притоках,

исключая пиковые значения, концентрация растворенного кислорода варьировалась от 7,86 мг/л до 9,84 мг/л, при среднем значении 8,76 мг/л (табл. 2). В случае с пиковым значением растворенного кислорода на участке влияния сброса ГЛК (насыщение кислородом составляет 184 %), здесь также выявлены высокие значения азота нитритного, нитратного и аммонийного и повышенные значения фосфатов, что возможно связано с процессом эвтрофикации. Так как отношение N:P составило 5,8 (менее 16) это говорит о том, что содержание фосфора достаточно высокое, чтобы сдерживать рост фитопланктона, поэтому процесс эвтрофикации может быть замедлен или быть на начальной стадии [32–34]. На основании гидрохимических показателей (рН, нитратный азот, фосфатный фосфор) можно отнести точки 11–12, которые находятся в зоне влияния ГЛК к эвтрофному уровню слабозагрязненных вод с выраженной тенденцией к гипертрофности, который соответствует статусу весьма загрязненного водоема.

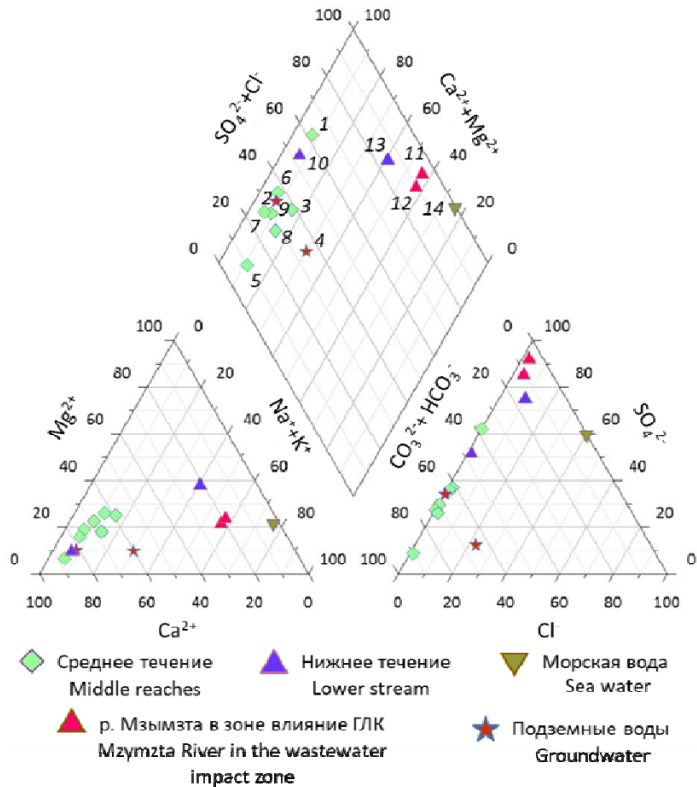


Рисунок 2. Химический состав р. Мзымта и её притоков в среднем и нижнем течении на диаграмме Пайпера
Figure 2. Chemical composition of the Mzymta River and its tributaries in the middle and lower reaches on Piper diagram

Таблица 2. Содержание растворенного кислорода и биогенных элементов р. Мзымта и её притоков в среднем и нижнем течении
Table 2. Dissolved oxygen and nutrient content of the Mzymta River and its tributaries in its middle and lower reaches

№	O ₂	N–NO ₂ ⁻	N–NO ₃ ⁻	N–NH ₄ ⁺	P–PO ₄ ³⁻	Si
	мг/л / mg/l					
1	9,18	< п.о.*	0,15	< п.о.	0,08	2,62
2	9,84	< п.о.	0,21	0,01	0,07	2,58
3	8,65	0,0004	0,14	0,07	< п.о.	1,74
4	0,00	< п.о.	< п.о.	0,05	0,64	9,37
5	8,07	< п.о.	0,16	< п.о.	< п.о.	1,94
6	8,40	0,003	0,20	0,003	< п.о.	2,05
7	8,80	< п.о.	0,27	0,01	0,10	3,05
8	7,86	< п.о.	0,10	0,01	0,08	2,78
9	9,41	< п.о.	0,38	< п.о.	< п.о.	1,93
10	9,19	0,002	0,06	0,002	0,02	1,71
11	14,29	0,133	1,17	1,21	0,43	3,89
12	9,50	0,011	0,45	0,51	0,11	2,44
13	8,86	0,004	0,30	0,15	0,07	2,24
14	7,04	0,010	0,07	< п.о.	0,04	0,83

Примечание: *<п.о. – ниже предела обнаружения
Note: *<po. – below detection limit

Зафиксированное высокое насыщение кислородом можно объяснить тем, что в дневное время в период высоких температур из-за высокой интенсивности радиации процесс фотосинтеза водорослей становится сильным и генерирует большое количество растворенного кислорода. Кислород удерживается, в основном в виде крошечных пузырьков воздуха в водорослях. При этом в ночное время насыщение кислородом может падать до 20 % [32; 35]. Такое явление может оказать сильное влияние на водную биоту, которые не способны адаптироваться к этим резким колебаниям, и привести к кислородному шоку и в последующем к их гибели, что напрямую способствует к

развитию эвтрофикации на данном участке. Стоит отметить также т.12, расположенная в зоне влияния ГЛК здесь также зафиксированы повышенные значения азотистых соединений и насыщение кислородом составляет 108,8 %, а соотношение N:P равно 9, что также может свидетельствовать об антропогенной эвтрофикации на этом участке. Сравнивая концентрации кремния в основных притоках Мзымты, где наибольшие значения были выявлены в р. Кепша (3,05 мг/л), а наименьшие в рр. Лаура и Чвижепсе (1,74 и 1,94 мг/л, соответственно) (табл. 2), наблюдается такая же закономерность влияния притоков

на содержания кремния в р. Мзымта как и для всех биогенных соединений. Также стоит отметить, что выявленные повышенные значения кремния в т.11 связаны вероятно с влиянием ГЛК и протекающими процессами эвтрофикации, а в скважине Чвижепсе такие значения концентраций являются характерными для подземных вод.

Микроэлементный состав

По результатам анализа микроэлементного состава поверхностных вод реки Мзымты и её притоков были выделены группы микроэлементов, концентрации которых имеют однонаправленные изменения по мере движения вод вниз по течению. К ней относятся некоторые из тяжелых металлов – V, Mn, Fe, Co, Cu, Pb, а также Al, Ti и Cs. В р. Пслух и в зоне слияния с р. Мзымта концентрации выделенных элементов имеют пиковые значения, затем резко уменьшаются в р. Лаура и до р. Кепши, далее вновь увеличиваются, преимущественно в точках 8 и 13 (рис. 3). Поведение Cr, Cd, и Th имеет схожий характер с предыдущей группой, однако концентрации этих элементы имеют однонаправленную тенденцию к уменьшению в сторону моря. Стоит отметить, что воды р. Пслух (т.1), р. Мзымта в зоне её слияния с рр. Пслух (т.2) и Кепша (т.8), а также в зоне влияния ГЛК (т. 11–12) и устье р. Мзымта (т. 13) существенно обогащены микроэлементами ($C_i/K_k > 1$, где C_i – концентрация элемента, K_k – кларк концентрации речных вод) относительно кларка речных вод (более 50 % элементов) (тяжелые металлы, РЗЭ и др.). В остальных случаях геохимическую специализацию вод определяют менее 20 % микроэлементов. Так как для участка р. Пслух и зоны его впадения в р. Мзымта антропогенное влияние сведено к минимуму, поступление этих элементов может происходить в результате химического выветривания горных пород (имеющих вкрапления полиметаллической и сульфидной минерализации), сопровождающиеся их механическим разрушением и растворением.

В водах р. Мзымта в месте впадения р. Пслух и непосредственно в самом притоке зафиксированы превышения ПДК (питьевых вод) по Al (1,3–1,7 ПДК), Mn (1,1 ПДК) и Fe (4 ПДК) (табл. 3), а также в устье р. Мзымты по Al (1,3 ПДК) и Fe (2,7 ПДК). В обоих случаях превышение не связано с антропогенным влиянием, поскольку в верховьях реки такое влияние отсутствует, а повышенные концентрации алюминия и железа в устье реки вероятнее всего транспортируются со взвесью, высокое содержание которого характерно для устьевых участков. В остальных случаях превышения по ПДК питьевых вод для тяжелых металлов не зафиксировано, кроме участка слияния р. Кепша и р. Мзымта, где было выявлено превышение только по Fe (1,8 ПДК), которое скорее всего поступает также со взвешенным веществом из-за строительных работ выше по течению в русле р. Кепша. На рисунке 3 также видно, что в этой точке происходит увеличение концентраций всех тяжелых металлов.

Отдельное внимание требует уделить скважине Чвижепсе, подземная вода в которой обогащена большим спектром микроэлементов. Отличаются высокими содержанием такие элементы как Fe (7140 мкг/л), As (4510 мкг/л), Mn (320 мкг/л). Так как это минеральные подземные воды они обусловлены отличительной геохимической обстановкой (6,4 ед. рН, Eh = 0 мВ), способствующей к накоплению, и усиливающей миграционную способность этих элементов. При этом в

самой р. Чвижепсе и слияния её с Мзымтой выявлены минимальные концентрации всех тяжелых металлов, в том числе и мышьяка, что свидетельствует об отсутствии влияния минеральных вод с речными.

Для группы тяжелых металлов (Cr, Mn, Fe, Co, Ni), кремния и фосфатов, а также Cu с Co и Zn по результатам корреляционного анализа были выявлены статистические значимые связи ($R^2 > 0,532$, $p < 0,05$) (табл. 4). Вероятнее всего все эти элементы поступают в процессе растворения горных пород (алюмосиликатов, сульфидов и др.) и транспортируются со взвешенной частью.

Стоит также отметить, что никель имеет высокие корреляционные связи со всеми биогенными соединения, кроме азота-аммонийного, а нитриты имеют высокую корреляцию еще с Cu и Zn, что можно объяснить тем, что Cu и Zn являются биологически значимыми элементами, которые обеспечивают функции фотосинтеза и азотного обмена [35].

Редкоземельные элементы (РЗЭ). Распределение РЗЭ в воде могут служить индикаторами геохимических процессов, происходящих в системе вода–порода, а также отражать изменения водной среды при антропогенном воздействии [27; 38–45].

Концентрации РЗЭ в исследуемых водах (как Σ РЗЭ) варьируются от 0,02 до 6,72 мкг/л. Наибольшие значения обнаружены в водах р. Пслух (6,2 мкг/л), так же, как и многие тяжелые металлы в результате выщелачивания подстилающих пород. Наименьшие значения зафиксированы на участке от р. Лаура до р. Кепша (0,02–0,1 мкг/л). Некоторые микроэлементы (V, Al, Ti, Pb, Th) имеют положительную корреляцию ($R^2 > 0,532$, $p < 0,05$) с Σ РЗЭ, что говорит об их общем источнике, в том числе сильно высокие корреляционные связи с алюминием ($R^2 = 0,91$) свидетельствует о преимущественном переносе РЗЭ в составе глинистых частиц и свинцом ($R^2 = 0,96$) поступление в процессе выщелачивания горных пород с полиметаллическим орудением (медно-свинцовая минерогенная зона в среднем течении). Для всех исследуемых вод характерно преобладание легких РЗЭ над тяжелыми: доля легких РЗЭ в общем количестве составляет 68,6–80,9 %.

Для оценки степени проявления РЗЭ в речных водах пробы исследуемых вод были нормализованы к Северо-Американскому сланцу (NASC). Профили распределения РЗЭ, нормированные к сланцу, демонстрируют ярко выраженный европейский максимум для рр. Чвижепсе (и в зоне смешения с Мзымтой), Лаура и Кепша и цериевый минимум для них же, кроме р. Кепша (рис. 4). Графики распределения других речных вод относительно однотипны и имеют относительную обогащенность вод средними РЗЭ (от Sm до Dy) и согласуется с предыдущими исследованиями для данной территории [2].

Во всех изученных водах наблюдается дефицит церия (Ce/Ce_{NASC} составляет -0,34– -0,01). Рассчитанные значения европейской аномалии варьируются в пределах 0,04–0,75, при этом максимальная величина характерна для вод р. Чвижепсе и места слияния её с р. Мзымта. Отрицательная цериевая аномалия свидетельствует о частичном окислении Ce^{3+} до Ce^{4+} , который растворим, чем $Ce(III)$, поэтому он может выпадать в осадок, уменьшая концентрацию церия в воде. Также ионы церия могут адсорбироваться на частицах, таких как глина, кремний и оксиды железа, которые распространены в речных отложениях.

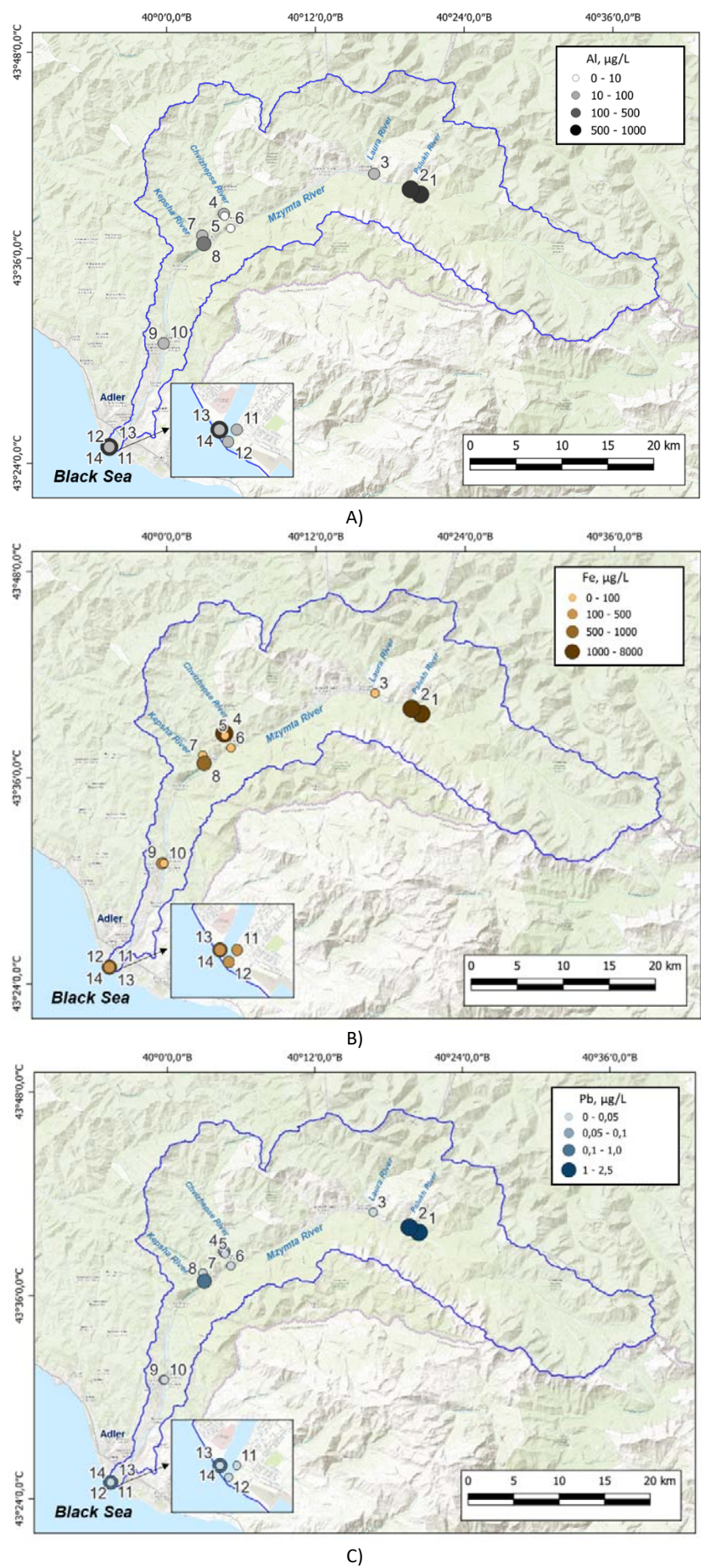


Рисунок 3. Концентрации Al (A), Fe (B), Pb (C) в р. Мзымта и её притоках
Figure 3. Concentrations of Al (A), Fe (B), Pb (C) in the Mzymta River and its tributaries

Таблица 3. Концентрации тяжелых металлов р. Мзымта и её притоков
Table 3. Concentrations of heavy metals in the Mzymta River and its tributaries

№	Mn	Fe	Co	Ni	Cu	Zn	As	Cd	Pb
	мкг/л / µg/L								
1	114,4	1170,8	1,58	1,12	2,71	5,58	1,22	0,020	2,24
2	103,2	1208,7	1,29	1,42	2,25	5,35	4,35	0,017	2,01
3	2,4	25,4	<п.о.	0,12	1,20	1,60	9,60	0,006	<п.о.
5	3,8	52,1	<п.о.	0,81	1,40	4,80	2,37	0,008	0,02
6	1,2	56,4	<п.о.	0,43	0,30	0,30	1,45	0,019	<п.о.
7	2,7	59,7	0,07	0,12	0,56	0,19	1,10	0,002	0,04
8	39,3	534,5	0,49	0,96	1,65	2,11	2,21	0,007	0,73
10	2,3	71,4	0,01	0,23	0,30	0,40	2,20	0,004	0,03
11	37,4	359,5	0,57	4,20	2,70	6,10	4,40	0,013	0,05
12	47,3	386,3	0,25	1,87	1,20	1,50	5,90	0,010	<п.о.
13	74,0	819,8	0,59	0,88	1,46	2,70	2,23	0,007	0,65
ПДКпитьевых вод MPCdrinking water	100	300	100	100	1000	5000	50	1	30

Таблица 4. Корреляционная матрица микроэлементов и биогенных соединений
Table 4. Correlation matrix of trace elements and nutrient compounds

	Cr	Mn	Fe	Co	Ni	Cu	Zn	NH ₄ ⁺	NO ₂ ⁻	NO ₃ ⁻	PO ₄ ³⁻	Si
Cr	1											
Mn	0,96	1										
Fe	0,96	0,97	1									
Co	0,91	0,96	0,90	1								
Ni	0,93	0,90	0,96	0,79	1							
Cu	0,11	0,21	0,20	0,53	0,17	1						
Zn	0,13	0,23	0,24	0,51	0,24	0,92	1					
NH ₄ ⁺	0,10	-0,09	-0,13	-0,09	0,08	0,61	0,58	1				
NO ₂ ⁻	0,65	0,17	0,17	0,58	0,94	0,84	0,91	0,94	1			
NO ₃ ⁻	0,52	0,02	0,01	0,05	0,91	0,42	0,42	0,97	0,95	1		
PO ₄ ³⁻	0,87	0,74	0,80	0,68	0,92	0,27	0,38	0,38	0,98	0,97	1	
Si	0,94	0,87	0,94	0,83	0,96	0,25	0,27	0,07	0,82	0,70	0,92	1

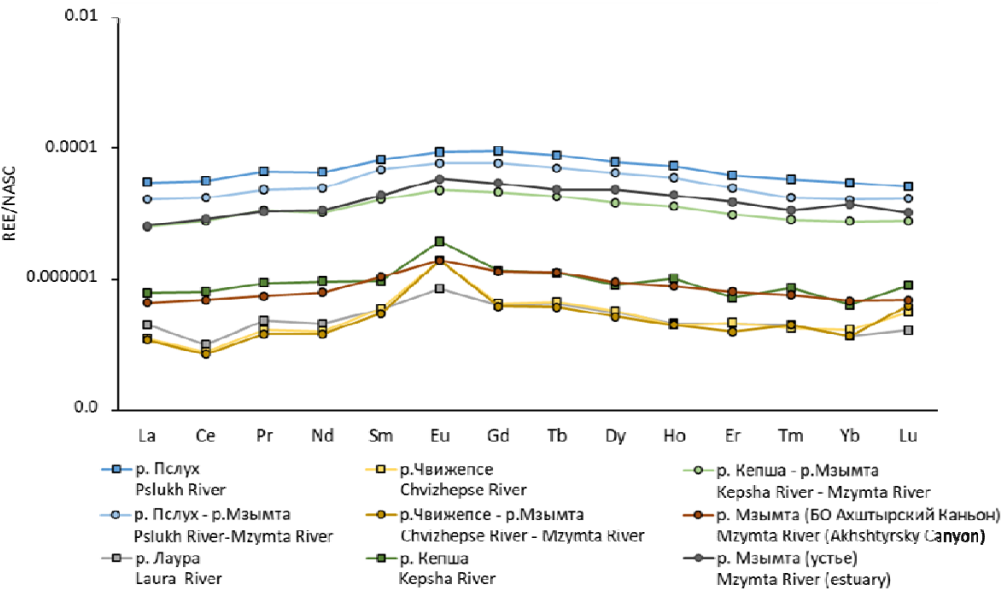


Рисунок 4. Профили распределения РЗЭ р. Мзымта и её притоков, нормализованные по отношению к NASC
Figure 4. REE distribution profiles of the Mzymta River and its tributaries normalised with respect to NASC

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Основные черты механизма особенностей химического состава р. Мзымта определяются, с одной стороны, различными геологическими условиями притоков, режимом вод на этих участках, уклоном реки, с другой стороны, повышенной антропогенной загруженностью в нижнем течении.

В распределении гидрохимических показателей прослеживается ярко выраженная закономерность влияния притоков на изменения pH и общей щелочности по мере движения водных масс вниз по течению реки Мзымты. Также нижнее течение реки, по сравнению со средним, отличается более высокими концентрациями всех биогенных соединений. из-за характерного более высокого уровня температур, а также локального влияния сточных вод.

Выделены группы микроэлементов (V, Al, Ti Mn, Fe, Co, Cu, Pb, Cs и PЗЭ), концентрации которых имеют однонаправленные изменения по мере движения вод вниз по течению. В том числе, для р. Пслух и в зоне слияния её с р. Мзымта установлены превышения ПДК по Al, Fe и Mn, которые не связаны с антропогенным воздействием и поступают в результате химического выветривания горных пород, что подтверждается их обогащенностью относительно кларка речных вод. На участках слияния р. Кепша с р. Мзымта и в устье р. Мзымта выявленные повышенные концентрации группы микроэлементов, в том числе тяжелых металлов, поступающие со взвешенным веществом как из-за естественных процессов – высокого содержания взвести в устьевых зонах, так и антропогенного вмешательства – в результате строительных работ в русле реки.

БЛАГОДАРНОСТИ

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

ACKNOWLEDGMENT

The study was supported by Russian Science Foundation grant No. 24-27-20125, <https://rscf.ru/project/24-27-20125/>.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Костылева А.В. Распределение растворенного органического углерода в приустьевых районах Большого Сочи (северо-восточная часть Черного моря) // *Океанология*. 2015. Т. 55. N 2. С. 224–230. <https://doi.org/10.7868/S0030157415020082>
2. Литвиненко Ю.С., Захарихина Л.В. Геохимия и радиоэкология вод и донных отложений р. Мзымты черноморского побережья // *Геохимия*. 2022. Т. 67. N 4. С. 376–393. <https://doi.org/10.31857/S001675522030049>
3. Маккавеев П.Н., Завьялов П.О. Геохимия речного стока в Чёрное море. Глава 3.2 Сток малых и средних рек российского побережья Черного моря и его влияние на характеристики вод. Москва: Научный мир, 2018. С. 287–321.
4. 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. N 3. С. 380–402. <https://doi.org/10.31857/S003015742203011X>
5. 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. С. 412–417.
6. Savenko A.V., Savenko V.S. Trace Element Composition of the Dissolved Matter Runoff of the Russian Arctic Rivers // *Water*. 2024. V. 16. N. 4 (565). <https://doi.org/10.3390/w16040565>

7. Савенко А.В., Савенко В.С., Ефимов В.А., Покровский О.С. Микроэлементный состав вод устьевого участка р. Колымы // *Доклады Российской академии наук. Науки о Земле*. 2023. Т. 509. N 2. С. 272–275. <https://doi.org/10.31857/S2686739722602800>
8. Комаров Р.С., Решетняк О.С. Пространственно-временная изменчивость ионного стока в бассейне р. Кубани // *Геология и геофизика Юга России*. 2024. Т. 14. N 3. С. 191–203. <https://doi.org/10.46698/q44917472-5566-w>
9. Шестеркина Н.М., Шестеркин В.П. Микроэлементы в речных водах побережья Татарского пролива (восточный макросклон северного Сихотэ-Алиня) // *Вестник Санкт-Петербургского университета. Науки о Земле*. 2024. Т. 69. N 3. С. 509–527. <https://doi.org/10.21638/spbu07.2024.307>
10. Sharma M.K., Kumar P., Prajapati P., Bhanot K., Wadhwa U., Tomar G., Goyal R.K., Prasad B., Sharma B. Study of hydrochemical and geochemical characteristics and solute fluxes in Upper Ganga Basin, India // *Journal of Asian Earth Sciences*. X. 2022. V. 8. Article number 100108. <https://doi.org/10.1016/j.jaesx.2022.100108>
11. Лесникова П.С. Изменение макроэлементного состава речных вод в контрастных геологических условиях, река Сочи Черноморского побережья России // *Вестник ВГУ. Серия: География. Геоэкология*. 2023. N 3. С. 47–56. <https://doi.org/10.17308/geo/1609-0683/2023/3/47-56>
12. Durán A.V., Velasquez J.L., Neculqueo G., Deckart K., Lillo D.D., Frez L.N., Trogger D., Quezada A.C., Solé M.B., Escobar M.E. Extreme climatic events in northern Chile and their impact on the geochemical composition of the Huasco River // *Journal of South American Earth Sciences*. 2022. V. 118. Article number: 103927. <https://doi.org/10.1016/j.jsames.2022.103927>
13. Huang L., Luo Q., Wei G., Jia Z., Sun K., Zhao C., Yang M., Fang H., Fan Z., Zeng F. Different impacts of natural and anthropogenic factors on dissolved organic matter chemistry in coastal rivers: Implications for water management // *Journal of Environmental Management*. 2024. V. 368. Article number: 122236. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2024.122236>
14. Ansari A.J., Sen I.S., Sinha R. Trends of water composition and discharge in the Ramganga River, Ganga Basin over the last 40 years signal enhanced nitrate flux // *Journal of Hydrology*. 2024. V. 641. Article number: 131822. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2024.131822>
15. Liu Y., Su B., Mu H., Zhang Y., Chen L., Wu B. Effects of point and nonpoint source pollution on urban rivers: From the perspective of pollutant composition and toxicity // *Journal of Hazardous Materials*. 2023. V. 460. Article number: 132441. <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2023.132441>
16. Basnet N., Sitaula S., Bohara R., Bhattarai S., Rawal S., Uprety M.P., Awasthi M.P., Varol M., Kayastha S.P., Pant R.R. Hydro-chemical characteristics of Biring and Tangting Rivers (Nepal) and evaluation of water quality for drinking and irrigation purposes // *Environmental Research*. 2024. V. 261. Article number: 119697. <https://doi.org/10.1016/j.envres.2024.119697>
17. Dippong T., Török I., Tănăsia C., Resz M.-A. Impact of water and sediment pollution in Valea Viseu river, Romania // *Process Safety and Environmental Protection*. 2025. V. 195. Article number: 106796. <https://doi.org/10.1016/j.psep.2025.106796>
18. Ali G., Chaudhari M.P., Syed S., Rajpurohit D., Sanyal M., Shrivastav P.S., Hydrogeochemical investigation and water quality assessment of the Indus River in the semiarid region of Ladakh, India // *Marine Pollution Bulletin*. 2025. V. 211. Article number: 117413. <https://doi.org/10.1016/j.marpolbul.2024.117413>
19. Trinh D.A., Do N.T., Panizzo V.N., McGowan S., Salgado J., Large A.R., Henderson A.C., Vu T.T. Anthropogenic impacts on the water chemistry of a transboundary river system in Southeast Asia // *Journal of Asian Earth Sciences*. X. 2024. V. 12. Article number: 100183. <https://doi.org/10.1016/j.jaesx.2024.100183>
20. Завьялов П.О., Маккавеев П.Н., Коновалов Б.В., Осадчиев А.А., Хлебопашев П.В., Пелевин В.В., Грабовский А.Б., Ижицкий А.С., Гончаренко И.В., Соловьев Д.М., Полухин А.А. Гидрофизические и гидрохимические характеристики морских акваторий у устьев малых рек российского побережья Черного моря // *Океанология*. 2014. Т. 54. N 3. С. 293–308. <https://doi.org/10.7868/S0030157414030150>
21. Газеев В.М., Гурбанов А.Г., Кондрашов И.А. Палеогеновая базальтрахитовая формация Западного Кавказа: геохимическая специфика, вопросы петрогенезиса, геодинамическая типизация, металлогения // *Геология и геофизика Юга России*. 2018. N 4. С. 18–32. <https://doi.org/10.23671/VNC.2018.4.20131>
22. Пруцкий И.И. Карта полезных ископаемых: К-37-V. Государственная геологическая карта Российской Федерации. Новая серия. Карта полезных ископаемых. Кавказская серия, масштаб: 1:200000. ФГУП Кавказгеолсъемка, 2001. <https://www.geokniga.org/maps/32454> (дата обращения: 08.07.2024).
23. Борецкий Б.В., Ершов Г.Е., Кувыкина Ю.Ю. Условия формирования эксплуатационных запасов Нижнемзымтинского месторождения

- пресных подземных вод на Черноморском побережье Кавказа и их пространственно-временное изменение под влиянием интенсивной антропогенной нагрузки // Геоэкология. Инженерная геология, гидрогеология, геокриология. 2012. N 6. С. 507–519.
24. Лесникова П.С., Захарихина Л.В., Литвиненко Ю.С., Шевелев С.Г., Варельджян Г.В. Геохимия родниковых вод бассейнов рек Мзымты и Сочи, южный склон Кавказского хребта // Известия Российской академии наук. Серия географическая. 2023. Т. 87. N 8. С. 1258–1274. <https://doi.org/10.31857/S258755662308010>
25. Карелина Е.В., Марков В.Е., Блоков В.И. Перспективность Краснополянского района города Сочи на благороднометалльное оруденение // Вестник Российского университета дружбы народов. Серия: «Инженерные исследования». 2017. Т. 18. N 4. С. 497–504. <https://doi.org/10.22363/2312-8143-2017-18-4-497-504>
26. Джаошвили С. Реки Черного моря. Технический отчет N 71. Европейское агентство по охране окружающей среды, 2002. 58 с.
27. Ресурсы поверхностных вод СССР. Том 9. Закавказье и Дагестан. Выпуск 1. Западное Закавказье. Гидрографическое описание рек и озер / ред. В.Ш. Цомая. Ленинград: Гидрометеиздат, 1974. 578 с.
28. Руководство по химическому анализу морских и пресных вод при экологическом мониторинге рыбохозяйственных водоемов и перспективных для промысла районов Мирового океана / ред. В.В. Сапожников. М.: Изд-во ВНИРО, 2003. 202 с.
29. Руководство по химическому анализу поверхностных вод суши. Л.: Гидрометеиздат, 1977. 541 с.
30. Dickson A.G., Sabine C.L., Christian J.R. Guide to best practices for ocean CO₂ measurements. PICES Special Publication 3. IOCCP Report. 2007. N 8. 196 p.
31. РД 52.24. 405–2018. Массовая концентрация сульфатов в водах. Методика измерений турбидиметрическим методом. Ростов-на-Дону: Росгидромет, ФГБУ «ГХИ», 2018. 30 с.
32. Nguyen D.V., Nguyen A.B., Hoang T. H. Dissolved Oxygen as an Indicator for Eutrophication in Freshwater Lakes // Environmental Engineering and Management for Sustainable Development, International Conference, Proceedings. 2016. N. 47.
33. Kannel P.R., Lee S., Khan S.P. Application of water quality indices and dissolved oxygen as indicators for river water classification and urban impact assessment // Environmental Monitoring and Assessment. 2007. V. 132. N 1–3. P. 93–110. <https://doi.org/10.1007/s10661-006-9505-1>
34. Yang X., Wu X., Hao H., He Z. Mechanisms and assessment of water eutrophication // Journal of Zhejiang University Science B. 2008. P. 197–209. <https://doi.org/10.1631/jzus.B0710626>
35. Addy K., Green L. Dissolved Oxygen and Temperature // Natural Resources Facts. Fact Sheet. 1997. N 96–3.
36. Mackey K.R.M., Chien Ch., Post A.F., Saito M.A. Paytan A. Rapid and gradual modes of aerosol trace metal dissolution in seawater // Frontiers in Microbiology. 2015. V. 5. Article number: 794. <https://doi.org/10.3389/fmicb.2014.00794>
37. Дубинин А.В. Геохимия редкоземельных элементов в океане. Москва: Наука. 2006. 360 с.
38. Чудаев О.В., Челноков Г.А., Брагин И.В., Харитонов Н.А., Рычагов С.Н., Нуждаев А.А., Нуждаев И.А. Геохимические особенности распределения основных и редкоземельных элементов в Паратунской и Большебанной гидротермальных системах Камчатки // Тихоокеанская геология. 2016. Т. 35. N 6. С. 102–119.
39. Харитонов Н.А., Филимонова Е.А., Кортюнов Е.А., Самарцев В.Н., Дробязко Е.В., Сорокоумова Я.В., Гречушников М.Г., Прошкина А.Л., Поздняков С.П. Изотопно-геохимические характеристики природных вод юго-западной части Крымского полуострова // Водные ресурсы. 2022. Т. 49. N 4. С. 474–491. <https://doi.org/10.31857/S0321059622040095>
40. Петренко Д.Б., Ерофеева К.Г., Окина О.И. Редкоземельные элементы в окружающей среде: концентрации, особенности геохимической миграции и методы определения (обзор) // Теоретическая и прикладная экология. 2022. N 1. С. 6–16. <https://doi.org/10.25750/1995-4301-2022-1-006-016>
41. Ветошкина А.В., Чекрыжов И.Ю., Паничев А.М., Вах Е.А., Барановская Н.В., Луценко Т.Н. Радиоактивные (Th, U) и редкоземельные элементы в природных водах центрального Сихотэ-Алиня (Приморский край) // Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов. 2022. Т. 333. N 1. С. 45–56. <https://doi.org/10.18799/24131830/2022/1/3408>
42. Романова Т.И., Коротков М.Г., Коржов Ю.В. Распространенность редкоземельных элементов в природных водах г. Ханты-Мансийска // Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов. 2024. Т. 335. N 7. С. 20–32. <https://doi.org/10.18799/24131830/2024/7/4546>
43. Lafrenière M., Lapierre J., Ponton D.E., Guillemette F., Amyot M. Rare earth elements (REEs) behavior in a large river across a geological and anthropogenic gradient // Geochimica et Cosmochimica Acta. 2023. V. 353. P. 129–141. <https://doi.org/10.1016/j.gca.2023.05.019>
44. Kim T., Kim H., Kim G. Tracing river water versus wastewater sources of trace elements using rare earth elements in the Nakdong River estuarine waters // Marine Pollution Bulletin. 2020. V. 160. Article number: 111589. <https://doi.org/10.1016/j.marpolbul.2020.111589>
45. Song W., Wu Z., Yi W., Wang S., Zhang H., Liu J. Rare earth elements in the Yellow River estuary, China: Composition, distribution, and pollution insights, Marine Pollution Bulletin. 2025. V. 212. Article number: 117599. <https://doi.org/10.1016/j.marpolbul.2025.117599>

REFERENCES

- Kostyleva A.V. Distribution of dissolved organic carbon in river mouth areas of the greater Sochi region (North-Eastern part of the Black Sea). *Oceanology*, 2015, vol. 55, no. 2, pp. 224–230. (In Russian) <https://doi.org/10.7868/S0030157415020082>
- Litvinenko Yu.S., Zakharikhina L.V. Geochemistry and radioecology of waters and bottom sediments of the Mzymta River, the Black Sea coast. *Geochemistry international*, 2022, vol. 67, no. 4, pp. 376–393. (In Russian) <https://doi.org/10.31857/S0016752522030049>
- Makkaveev P.N., Zavyalov P.O. *Geokhimiya rechnogo stoka v Chernoe more. Glava 3.2 Stok malykh i srednikh rek rossiiskogo poberezhya Chernogo morya i ego vliyaniye na kharakteristiki vod* [Geochemistry of river runoff into the Black Sea. Chapter 3.2 Runoff of small and medium-sized rivers of the Russian Black Sea coast and its influence on water characteristics]. Moscow, Nauchny Mir Publ., 2018, pp. 287–321. (In Russian)
- Savenko A.V., Pokrovskii O.S. Transformation of Major and Trace Element Composition of the Dissolved Matter Runoff in the Mouths of Medium and Small Rivers of the Black Sea Coast of Russia. *Oceanology*, 2022, vol. 62, no. 3, pp. 380–402. <https://doi.org/10.31857/S003015742203011X> (In Russian)
- Makkaveev P.N., Polukhin A.A., Stepanova S.V. Studies of the estuaries of small and medium-sized rivers in the coastal zone of the Russian sector of the Black Sea. In: *Ekologicheskaya bezopasnost pribrezhnoi i shelfovoi zon i kompleksnoe ispol'zovanie resursov shelfa* [Environmental safety of coastal and shelf zones and integrated utilisation of shelf resources]. 2013, pp. 412–417. (In Russian)
- Savenko A.V., Savenko V.S. Trace Element Composition of the Dissolved Matter Runoff of the Russian Arctic Rivers. *Water*, 2024, vol. 16, no. 4 (565). <https://doi.org/10.3390/w16040565>
- Savenko A.V., Savenko V.S., Efimov V.A., Pokrovskii O.S. Trace element composition of the waters of the Kolyma River mouth section. *Doklady Earth Sciences*. 2023, vol. 509, no. 2, pp. 272–275. (In Russian) <https://doi.org/10.31857/S2686739722602800>
- Komarov R.S., Reshetnyak O.S. Spatiotemporal variability of ion flux in the Kuban River basin. *Geology and Geophysics of the South of Russia*. 2024, vol. 14, no. 3, pp. 191–203. (In Russian) <https://doi.org/10.46698/q44917472-5566-w>
- Shesterkina N.M., Shesterkin V.P. Trace elements in the river waters of the coast of the Tatar Strait (eastern macroslope of the northern Sikhote-Alin). *Vestnik of Saint Petersburg University. Earth Sciences*. 2024, vol. 69, no. 3, pp. 509–527. (In Russian) <https://doi.org/10.21638/spbu07.2024.307>
- Sharma M.K., Kumar P., Prajapati P., Bhanot K., Wadhwa U., Tomar G., Goyal R.K., Prasad B., Sharma B. Study of hydrochemical and geochemical characteristics and solute fluxes in Upper Ganga Basin, India. *Journal of Asian Earth Sciences*: X. 2022, vol. 8, article number: 100108. <https://doi.org/10.1016/j.jaesx.2022.100108>
- Lesnikova P. S. Changes in the Macroelemental Composition of River Waters in Contrast Geological Conditions, Sochi River of the Black Sea Coast of Russia. *Proceedings of VSU, Series: Geography. Geoecology*, 2023, no. 3, pp. 47–56. (In Russian) <https://doi.org/10.17308/geo/1609-0683/2023/3/47-56>
- Durán A.V., Velasquez J.L., Neculqueo G., Deckart K., Lillo D.D., Frez L.N., Trogger D., Quezada A.C., Solé M.B., Escobar M.E. Extreme climatic events in northern Chile and their impact on the geochemical composition of the Huasco River. *Journal of South American Earth Sciences*, 2022, vol. 118, article number: 103927. <https://doi.org/10.1016/j.jsames.2022.103927>
- Huang L., Luo Q., Wei G., Jia Z., Sun K., Zhao C., Yang M., Fang H., Fan Z., Zeng F. Different impacts of natural and anthropogenic factors on dissolved organic matter chemistry in coastal rivers: Implications for water management. *Journal of Environmental Management*, 2024, vol. 368, article number: 122236. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2024.122236>
- Ansari A.J., Sen I.S., Sinha R. Trends of water composition and discharge in the Ramganga River, Ganga Basin over the last 40 years signal enhanced nitrate flux. *Journal of Hydrology*, 2024, vol. 641, article number: 131822. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2024.131822>
- Liu Y., Su B., Mu H., Zhang Y., Chen L., Wu B. Effects of point and nonpoint source pollution on urban rivers: From the perspective of pollutant

- composition and toxicity. *Journal of Hazardous Materials*, 2023, vol. 460, article number: 132441. <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2023.132441>
16. Basnet N., Sitaula S., Bohara R., Bhattarai S., Rawal S., Uprety M.P., Awasthi M.P., Varol M., Kayastha S.P., Pant R.R. Hydro-chemical characteristics of Biring and Tangting Rivers (Nepal) and evaluation of water quality for drinking and irrigation purposes. *Environmental Research*, 2024, vol. 261, article number: 119697. <https://doi.org/10.1016/j.envres.2024.119697>
 17. Dippong T., Török I., Tănăsescu C., Resz M-A. Impact of water and sediment pollution in Valea Viseu river, Romania. *Process Safety and Environmental Protection*, 2025, vol. 195, article number: 106796. <https://doi.org/10.1016/j.psep.2025.106796>
 18. Ali G., Chaudhari M.P., Syed S., Rajpurohit D., Sanyal M., Shrivastav P.S., Hydrogeochemical investigation and water quality assessment of the Indus River in the semiarid region of Ladakh, India. *Marine Pollution Bulletin*, 2025, vol. 211, article number: 117413. <https://doi.org/10.1016/j.marpolbul.2024.117413>
 19. Trinh D.A., Do N.T., Panizzo V.N., McGowan S., Salgado J., Large A.R., Henderson A.C., Vu T.T. Anthropogenic impacts on the water chemistry of a transboundary river system in Southeast Asia. *Journal of Asian Earth Sciences*, 2024, vol. 12, article number: 100183. <https://doi.org/10.1016/j.jaesx.2024.100183>
 20. Zavyalov P.O., Makkaveev P.N., Konovalov B.V., Osadchiv A.A., Khlebopashev P.V., Pelevin V.V., Grabovskii A.B., Izhitskii A.S., Goncharenko I.V., Solov'ev D.M., Polukhin A.A. Hydrophysical and hydrochemical characteristics of the sea areas adjacent to the estuaries of small rivers of the Russian coast of the Black Sea. *Oceanology*, 2014, vol. 54, no. 3, pp. 293–308. (In Russian) <https://doi.org/10.7868/S0030157414030150>
 21. Gazeev V.M., Gurbanov A.G., Kondrashov I.A. Paleogenic basalt-trachytic formation of west caucasus: geochemical specialization, question of petrogenesis, geodynamic typisation, metallogeny. *Geology and Geophysics of the South of Russia*, 2018, no. 4, pp. 18–32. (In Russian) <https://doi.org/10.23671/VNC.2018.4.20131>
 22. Prutskii N.I. *Karta poleznykh iskopayemykh: K-37-V. Gosudarstvennaya geologicheskaya karta Rossiiskoi Federatsii. Novaya seriya. Karta poleznykh iskopayemykh. Kavkazskaya seriya, mashtab: 1:200000*. [Mineral map: K-37-V. State Geological Map of the Russian Federation. New series. Map of Mineral Resources. Caucasian series, scale: 1:200000]. FGUGP Kavkazgeolsemka, 2001. Available at: <https://www.geokniga.org/maps/32454> (accessed 08.07.2024)
 23. Borevskii B.V., Ershov G.E., Kuvykina Yu.Yu. Conditions of formation of operational reserves of Nizhnemymtinskoye fresh groundwater deposit on the Black Sea coast of the Caucasus and their spatial and temporal changes under the influence of intensive anthropogenic load. *Geoeкологиya. Inzhenernaya geologiya, gidrogeologiya, geokriologiya* [Geoeology. Engineering geology, hydrogeology, geocryology]. 2012, no. 6, pp. 507–519. (In Russian)
 24. Lesnikova P.S., Zakharikhina L.V., Litvinenko Yu.S., Shevelev S.G., Varel'dzhyan G.V. Geochemistry of Spring Water of Mzymta and Sochi River Basins, Southern Slope of the Caucasus Ridge. *Izvestiya Rossiiskoi Akademii nauk. Seriya geograficheskaya*, 2023, vol. 87, no. 8, pp. 1258–1274. (In Russian) <https://doi.org/10.31857/S258755662308010>
 25. Karelina E.V., Markov V.E., Blokov V.I. Prospectivity of Krasnopol'yansky district in Sochi (Russia) for precious metal mineralization. *RUDN Journal of Engineering Research*, 2017, vol. 18, no. 4, pp. 497–504. (In Russian) <https://doi.org/10.22363/2312-8143-2017-18-4-497-504>
 26. Dzhaozhvili S. *Reki Chernogo morya* [Rivers of the Black Sea]. Technical Report No. 71. European Environment Agency, 2002, 58 p. (In Russian)
 27. Tsomaya V.Sh. *Resursy poverkhnostnykh vod SSSR. Tom 9. Zakavkazie i Dagestan. Vypusk 1. Zapadnoye Zakavkaz'e. Gidrograficheskoe opisanie rek i ozer* [Surface water resources of the USSR. Volume 9. Transcaucasia and Dagestan. Issue 1. Western Transcaucasia. Hydrographic description of rivers and lakes]. Leningrad, Gidrometeoizdat Publ., 1974, 578 p. (In Russian)
 28. Sapozhnikov V.V. *Rukovodstvo po khimicheskomu analizu morskikh i presnykh vod pri ekologicheskoy monitoringe rybnokhozyaistvennykh vodoemov i perspektivnykh dlya promysla raionov Mirovogo okeana* [Guidelines for chemical analysis of marine and fresh waters in environmental monitoring of fishery reservoirs and prospective areas of the World Ocean]. Moscow, VNIRO Publ., 2003, 202 p. (In Russian)
 29. *Rukovodstvo po khimicheskomu analizu poverkhnostnykh vod sushi* [Manual on chemical analysis of surface waters of land]. Leningrad, Gidrometeoizdat Publ., 1977, 541 p. (In Russian)
 30. Dickson A.G., Sabine C.L., Christian J.R. Guide to best practices for ocean CO₂ measurements. PICES Special Publication 3. IOCCP Report, 2007, no. 8, 196 p.
 31. RD 52.24. 405–2018. Mass concentration of sulphates in waters. Methodology of measurements by turbidimetric method. Rostov-on-Don: Roshdyromet, FGBU «GCI», 2018, 30 p. (In Russian)
 32. Nguyen D.V., Nguyen A.B., Hoang T. H. Dissolved Oxygen as an Indicator for Eutrophication in Freshwater Lakes. *Environmental Engineering and Management for Sustainable Development, International Conference, Proceedings*, 2016, no. 47.
 33. Kannel P.R., Lee S., Khan S.P. Application of water quality indices and dissolved oxygen as indicators for river water classification and urban impact assessment. *Environmental Monitoring and Assessment*, 2007, vol. 132, no. 1–3, pp. 93–110. <https://doi.org/10.1007/s10661-006-9505-1>
 34. Yang X., Wu X., Hao H., He Z. Mechanisms and assessment of water eutrophication. *Journal of Zhejiang University Science B*, 2008, pp. 197–209. <https://doi.org/10.1631/jzus.B0710626>
 35. Addy K., Green L. Dissolved Oxygen and Temperature. *Natural Resources Facts. Fact Sheet*, 1997, no. 96–3.
 36. Mackey K.R.M., Chien Ch., Post A.F., Saito M.A. Paytan A. Rapid and gradual modes of aerosol trace metal dissolution in seawater. *Frontiers in Microbiology*, 2015, vol. 5, article number: 794. <https://doi.org/10.3389/fmicb.2014.00794>
 37. Dubinin A.V. *Geokhimiya redkozemelnykh elementov v okeane* [Geochemistry of rare earth elements in the ocean]. Moscow, Nauka Publ., 2006, 360 p. (In Russian)
 38. Chudaev O.V., Chelnokov G.A., Bragin I.V., Kharitonova N.A., Rychagov S.N., Nuzhdaev A.A., Nuzhdaev I.A. Geochemical peculiarities of distribution of major and rare earth elements in the Paratun and Bolshebanna hydrothermal systems of Kamchatka. *Tikhookeanskaya geologiya* [Pacific Geology]. 2016, vol. 35, no. 6, pp. 102–119. (In Russian)
 39. Kharitonova N.A., Filimonova E.A., Kortunov E.A., Samartsev V.N., Drobyazko E.V., Sorokoumova Ya.V., Grechushnikova M.G., Proshkina A.L., Pozdnyakov S.P. Isotope-geochemical characteristics of natural waters in the southwestern part of the Crimean Peninsula. *Water resources*, 2022, vol. 49, no. 4, pp. 474–491. (In Russian) <https://doi.org/10.31857/S0321059622040095>
 40. Petrenko D.B., Erofeeva K.G., Okina O.I. Rare earth elements in the environment: concentrations, migration characteristics and methods of determination (review). *Theoretical and applied ecology*, 2022, no. 1, pp. 6–16. (In Russian) <https://doi.org/10.25750/1995-4301-2022-1-006-016>
 41. Vetoshkina A.V., Chekryzhov I.Yu., Panichev A.M. Vakh E.A., Baranovskaya N.V., Lutsenko T.N. Radioactive (Th, U) and rare earth elements in natural waters of central Sikhote-Alin (Primorsky Krai). *Bulletin of the Tomsk polytechnic university. Geo assets engineering*, 2022, vol. 333, no. 1, pp. 45–56. (In Russian) <https://doi.org/10.18799/24131830/2022/1/3408>
 42. Romanova T.I., Korotkov M.G., Korzhov Yu.V. Prevalence of rare earth elements in natural waters of Khanty-Mansiysk. *Bulletin of the Tomsk polytechnic university. Geo assets engineering*, 2024, vol. 335, no. 7, pp. 20–32. (In Russian) <https://doi.org/10.18799/24131830/2024/7/4546>
 43. Laffrenière M., Lapierre, J., Ponton D.E., Guillemette F., Amyot M. Rare earth elements (REEs) behavior in a large river across a geological and anthropogenic gradient. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 2023, vol. 353, pp. 129–141. <https://doi.org/10.1016/j.gca.2023.05.019>
 44. Kim T., Kim H., Kim G. Tracing river water versus wastewater sources of trace elements using rare earth elements in the Nakdong River estuarine waters. *Marine Pollution Bulletin*, 2020, vol. 160, article number: 111589. <https://doi.org/10.1016/j.marpolbul.2020.111589>
 45. Song, W., Wu, Z., Yi, W., Wang, S., Zhang, H., Liu, J. Rare earth elements in the Yellow River estuary, China: Composition, distribution, and pollution insights. *Marine Pollution Bulletin*, 2025, vol. 212, article number: 117599. <https://doi.org/10.1016/j.marpolbul.2025.117599>

КРИТЕРИИ АВТОРСТВА

Юлия А. Моисеева, Дарья В. Пургина предложили концепцию и дизайн исследования. Юлия А. Моисеева, Дарья В. Пургина, Андрей С. Торопов, Ульяна В. Главная, Пётр Т. Ситников, Айгуль Ф. Шигапова, Вероника В. Бояркина и Андрей А. Гринько принимали участие в отборе проб, анализе и интерпретации данных. Юлия А.

AUTHOR CONTRIBUTIONS

Yulia A. Moiseeva, Daria V. Purgina proposed the concept and design of the study. Yulia A. Moiseeva, Daria V. Purgina, Andrey S. Toropov, Ulyana V. Glavnaya, Peter T. Sitnikov, Aigul F. Shigapova, Veronika V. Boyarkina and Andrey A. Grinko participated in sampling, data analysis and interpretation. Yulia A. Moiseeva and Andrey S. Toropov

Моисеева и Андрей С. Торопов участвовали в написании и редактировании рукописи до подачи в редакцию. Все авторы в равной степени несут ответственность при обнаружении плагиата, самоплагиата или других неэтических проблем.

participated in writing and editing the manuscript before submission to the Editor. All authors are equally responsible for plagiarism, self-plagiarism and other ethical transgressions.

КОНФЛИКТ ИНТЕРЕСОВ

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

NO CONFLICT OF INTEREST DECLARATION

The authors declare no conflict of interest.

ORCID

Юлия А. Моисеева / Yulia A. Moiseeva <https://orcid.org/0000-0002-8166-1040>

Дарья В. Пургина / Daria V. Purgina <https://orcid.org/0000-0001-7169-8264>

Андрей С. Торопов / Andrey S. Toropov <https://orcid.org/0000-0001-7759-2831>

Ульяна В. Главная / Ulyana V. Glavnaya <https://orcid.org/0009-0003-4837-6963>

Пётр Т. Ситников / Peter T. Sitnikov <https://orcid.org/0009-0002-5979-3052>

Айгуль Ф. Шигапова / Aigul F. Shigapova <https://orcid.org/0009-0003-6826-0482>

Вероника В. Бояркина / Veronika V. Boyarkina <https://orcid.org/0009-0003-7815-8094>

Андрей А. Гринько / Andrey A. Grinko <https://orcid.org/0000-0002-8597-8475>