

ГЕОХИМИЯ И РАДИОЭКОЛОГИЯ ВОД И ДОННЫХ ОТЛОЖЕНИЙ р. МЗЫМТЫ ЧЕРНОМОРСКОГО ПОБЕРЕЖЬЯ

© 2022 г. Ю. С. Литвиненко^а, *, Л. В. Захарихина^б, **

^аООО “ЭкоГеоЛит”, ул. Мосфильмовская, 17 Б, Москва, 119330 Россия

^бФедеральный исследовательский центр Субтропический научный центр Российской академии наук,
ул. Яна Фабрициуса, 2/28, Сочи, Краснодарский край, 354002 Россия

*e-mail: ecogelolit@mail.ru

**e-mail: zlv63@yandex.ru

Поступила в редакцию 15.08.2020 г.

После доработки 08.10.2020 г.

Принята к публикации 04.12.2020 г.

Геохимический состав вод р. Мзымты подвержен резким сезонным изменениям. Летом они обогащены относительно средних содержаний в речной воде 34 химическими элементами, главные из которых все редкоземельные элементы (РЗЭ), Fe, Mn, Cs, Al и Cd. Суммы РЗЭ имеют в воде выдержанную зависимость $CPЗЭ > TPЗЭ > LPЗЭ$ с общим положительным трендом к устью. Весной воды реки обогащены только 14 элементами. Состав РЗЭ беднее, фракционирование слабо выражено. В летний сезон отмечается значительный рост загрязнения вод элементами относительно ПДК, в целом усиливающееся от верховий к устью реки. Общую геохимическую специализацию донных отложений, с незначительными превышениями над средними содержаниями в верхней части континентальной коры для обнажающихся в бассейне пород, определяют 27 элементов. Несоответствие высокого уровня загрязнения вод в летний период и слабого загрязнения донных отложений реки связано с низким содержанием в последних тонкодисперсного минерального и органического вещества. Выделено три основных типа источников поступления химических элементов в воду реки: природные, природно-техногенные и антропогенно-техногенные. Максимальный вклад в загрязнение вод на всем протяжении реки вносят природные источники – слагающие бассейн горные породы. Аномальное повышение концентраций химических элементов, в том числе Th и U, в среднем и нижнем течении реки связано с природно-техногенными источниками на ближайших склонах долины. Это лишённые почвенно-растительного слоя техногенные площадки и осыпи, дорожные, железнодорожные и иные строительные насыпи размельчённых пород. Антропогенно-техногенные факторы вносят ограниченный вклад в загрязнение вод и донных отложений реки. Радиоэкологическое состояние вод и донных отложений р. Мзымты может быть признано благополучным.

Ключевые слова: Мзымта, вода, донные отложения, геохимия, специализация, загрязнение, торий, уран, редкоземельные элементы, источники

DOI: 10.31857/S0016752522030049

ВВЕДЕНИЕ

Река Мзымта – крупнейшая река Главного Кавказского хребта и Сочинского Черноморского побережья, в долине которой в 2008–2013 гг. выполнено строительство объектов Зимних Олимпийских игр 2014 г. в г. Сочи. Повышенный интерес к экологическому состоянию экосистемы бассейна р. Мзымты объясним расположением здесь многочисленных лечебных, горно-рекреационных и спортивно-туристических объектов, имеющих международное значение, и в первую очередь комплекса Красная Поляна. Еще до олимпийского строительства экологи относили устье, нижнее и среднее течение р. Мзымты к территории с напряженной экологической обстановкой (Гудкова, Оноприенко, 2007). Наблюдения служб Росгидромета до начала строительства объектов Олимпийских игр 2014 г. показывали устойчивые превышения ПДК в 2–4 раза в воде р. Мзымты для Fe, Cu, Mn и Zn (Отчет..., 2010). Согласно данным ФГБУ “Специализированный центр по гидрометеорологии и мониторингу окружающей среды Черного и Азовского морей” (<https://www.pogodasochi.ru/>) превышение ПДК Cu, Mn, Fe, Zn и Al в воде горных рек черноморского побережья Кавказа в настоящее время имеет природный характер и не связано с антропогенным воздействием.

Весьма актуальными являются эколого-геохимические исследования донных отложений реки,



Рис. 1. Карта-схема опробования вод и донных отложений р. Мзымты.

которые могут быть использованы как дополнительный индикатор качества вод (Сает и др., 1990). Кроме того, донные отложения представляют собой вторичный источник поступления химических элементов в воду реки (Сает и др., 1990).

Данных о качестве вод и донных отложений р. Мзымты по уровню концентраций широкого спектра химических элементов, включая торий и уран, по состоянию на 2019 г в доступных публикациях нами не установлено.

Основные задачи работы — исследования геохимического состава, распределения и поведения химических элементов в воде и донных отложениях р. Мзымты, определение основных природных и техногенных источников элементов в этих средах с использованием индикаторных свойств элементов, графических построений, корреляционного и факторного анализов, оценка существующего состояния воды и донных отложений по показателям химического и радиоэкологического загрязнения.

ОБЪЕКТЫ И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЙ

Река Мзымта берет свое начало из небольшого озера, на высоте 2440 м и впадает в Черное море в Адлерском районе Сочи (Дрожжина, 2013) (рис. 1). Длина реки 89,7 км, площадь водосбора 885 км², средняя высота бассейна 1309 м. Скорость течения реки изменяется от 0,4–1,2 м/с (на плесах) до 2–3 м/с. Долина в верховьях реки V-образная. Крутизна склонов 30°–35°, местами до 40°–50°.

При выходе на Адлерскую низменность р. Мзымта течет по широкой, хорошо разработанной долине.

Режим стока — паводочный с годовой амплитудой колебаний уровня до 2,32 м. Средний годовой расход воды в среднем течении реки около 44 м³/с, в приустьевой увеличивается более, чем в 2 раза. Характерны хорошо выраженные половодье в теплый период года, частые осенние паводки и устойчивая зимняя межень. На весну проходит до 42–50% годового стока, в летний период — до 30% и в осенний — до 15–17%. Источники питания (в районе Красной Поляны): дождевое — 31%, снеговое — 39%, подземное — 30%, ледниковое — 0,1% (Лурье, Панов, 2012).

Согласно данным ФГБУ “Специализированный центр по гидрометеорологии и мониторингу окружающей среды Черного и Азовского морей” (<https://www.pogodasochi.ru/>) воды р. Мзымты преимущественно гидрокарбонатные, группа кальция, слабощелочные (рН 7,5–8,5). Вода ультрапресная с минерализацией от 50 мг/л в верховьях до 200 мг/л в среднем и нижнем течении (Борисов, 2005).

В гранулометрическом составе донных наносов преобладают фракции от 30 до 60 мм (60%), в мелкой фракции — в основном песок (Отчет..., 2010; Дрожжина, 2013). Воды и донные отложения обеднены органическим веществом, концентрация растворенного кислорода изменяется в небольшом диапазоне и в среднем составляет

10.0 ± 0.47 мг/дм³, что соответствует нормативным требованиям (Отчет..., 2010).

По данным государственного экологического мониторинга в 2019 г. качество воды р. Мзымта соответствовало критерию “грязная” (<https://www.pogodasochi.ru/>), что обусловлено, в первую очередь, высоким содержанием тяжёлых металлов (превышение ПДК для Cu, Mn, Fe, Zn и Al).

Для установления геохимической и радиоэкологической характеристик вод и донных отложений р. Мзымты было выполнено их опробование на 7 ключевых участках (точках), начиная с верховий до устья реки (рис. 1), заложенных с учетом расположения основных потенциальных источников загрязнения (Организация..., 2016).

Точки Мз 1а и Мз 1 расположены на территории Кавказского государственного природного биосферного заповедника на удалении от техногенных источников загрязнения. Точка Мз 2 заложена выше, а точка Мз 3 ниже по течению от спортивно-туристического комплекса Красная Поляна. В последние годы на левобережье р. Мзымты в этом интервале ведется строительство туристических баз и горнолыжных курортов. Точка Мз 5 располагается в предгорной части реки, ниже по течению от крупных правобережных притоков Чвижепсе и Кепша и одноименных им населенных пунктов. В точке Мз 6 река протекает по сильно расчлененной Адлерской низменности. Точка Мз 7 находится на окраине г. Адлер, в районе частного сектора (Молдовка). На правом и левом берегах располагаются мелкие населенные пункты. Между точками Мз 3 и Мз 7 непосредственно вдоль берегов реки проходит автомобильная и железнодорожная трассы из Адлера до станции Роза Хутор, в том числе построенные при подготовке Зимних Олимпийских игр 2014 г. в г. Сочи.

По составу пород, слагающих геологическое основание долины р. Мзымты, можно выделить четыре основных интервала (Лаврищев и др., 2002):

1 — от истоков до точки Мз 1а река размывает юрские габбро-диориты и граниты;

2 — от точки Мз 1а до точки Мз 3 река течет в основном вдоль геологических структур, сложенных преимущественно терригенными породами (аргиллиты, алевролиты, песчаники), редко встречаются пирокластические породы и лавы кислого, среднего и основного составов, линзы и прослои известняков и конгломератов;

3 — от точки Мз 3 до отметки реки в 5 км ниже точки Мз 5 русло проходит поперек залегания пород, представленных аргиллитами с прослоями песчаников, алевролитов, мергелей, известняками с прослоями мергелей, гравелитов и песчаников, редко туфы и лавы среднего состава, аргиллиты, туфопесчаники;

4 — от отметки реки в 5 км ниже точки Мз 5 до ее устья в основании современных аллювиальных отложений залегают палеогеновые и неогеновые глины, мергелистые глины с алевролитами, песчаниками, редко меловые известняки и мергели.

В бассейне р. Мзымты характерно развитие полиметаллической и золоторудной минерализаций и оруденения, имеющих площадное распространение на десятках и сотнях квадратных километров (Богущ, Черкашин, 2012). В породах территории широко развита рассеянная сульфидная минерализация (Карелина и др., 2017). В среднем течении реки встречаются субщелочные породы основного и среднего составов с редкометалльно-редкоземельной специализацией (Газеев и др., 2018).

Гидрохимическое опробование реки в точках Мз 1—Мз 7 выполнено в течении одного дня в июне 2019 г., в период дождевого и подземного питания. Проба воды в самом верховье р. Мзымты в точке Мз 1а отобрана в апреле 2019 г., при преимущественно снеговом питании, за счет поверхностного стока талых вод. Водные пробы отбирались в стерильные полистироловые пробирки.

Одновременно с гидрохимическим опробованием во всех точках произведен отбор проб донных отложений р. Мзымты из свежих, наиболее мелкозернистых наносов, которые перед отправкой на анализ высушивались и просеивались через сито — 1 мм.

Исследования химического состава вод и донных отложений проводились количественными методами — масс-спектрометрическим и атомно-эмиссионным анализами с индуктивно связанной плазмой (ICP-MS и ICP-AES): вод на 70 и донных отложений на 60 химических элементов, включая Th и U.

Для сравнения концентраций химических элементов (Ci) в водах р. Мзымты с их средними содержаниями в речной воде (Виноградов, 1967; Гордеев, Лисицын, 1978; Гордеев, 1983) в глобальном масштабе (K) во всех точках опробования рассчитаны кларки концентрации элементов $K_k = C_i/K$. Геохимическую специализацию (элементы с $K_k > 1$) вод р. Мзымты в период весеннего преимущественно снегового питания определяют значение K_k в точке Мз 1а, а в период летнего дождевого и грунтового питания — средние значения K_k ($K_{k,sp}$) в точках опробования Мз 1—Мз 7.

Средние содержания химических элементов в целом для донных отложений рек континентов не установлены. Согласно существующему представлению в любой точке русла донные отложения по своему химическому составу в первом приближении представляют собой природную среднюю пробу, характеризующую состав пород, слагающих ее бассейн денудации (Соловов, 1985). Учитывая это, при расчете кларков concentra-

ции элементов $K_k = C_i/K$ для донных отложений в точках опробования Мз 1 – Мз 7 за величину K приняты средние содержания химических элементов в осадочных горных породах верхней части континентальной коры (Grigoriev, 2003). Общую геохимическую специализацию отложений р. Мзымты определяют значения $K_{кр}$ по этим точкам. На площади водосбора верхней точки Мз 1а развиты габбро-диориты и граниты (Лаврищев и др., 2002). При расчете K_k элементов в донных отложениях в этой точке за K приняты их средние содержания в магматических породах (Grigoriev, 2003).

По величине K_k построены геохимические формулы вод и донных отложений реки в целом и отдельно для точки Мз 1а, путем ранжирования химических элементов по данному показателю и группировки их согласно выбранным интервалам. Элементы со значениями $K_k > 1$ отнесены к избыточным, со значениями $K_k < 1$ – к дефицитным.

Проведен корреляционный и факторный анализы содержаний химических элементов в речных водах и донных отложениях р. Мзымты. Расчеты выполнены по логарифмам концентраций элементов. Факторный анализ выполнен методом главных компонент. При интерпретации результатов использована первичная структура факторных нагрузок без варимаксного и косоугольного вращений факторных осей. Интерпретация факторов велась с учетом этой задачи, исходя из содержательного смысла показателей, на основе которых факторы были выделены – концентрации химических элементов.

При этом принимался во внимания общий анализ геохимического состава вод и донных отложений реки в разных точках опробования, гидрологические периоды отбора проб, экологические и геологические условия долины реки.

Расчеты коэффициентов корреляции между элементами и факторный анализ данных выполнены с помощью Программного пакета комплексной обработки геолого-геохимических данных “Gold Digger”, разработанного на кафедре геохимии геологического факультета МГУ (Воробьев, 2000).

Для идентификации источников химических элементов в воде и донных отложениях реки были использованы также индикаторные свойства редкоземельных элементов (РЗЭ) и Th/U отношения.

Оценка степени загрязнения вод реки нормируемыми химическими элементами, выполнена путем расчета для каждого из них во всех точках опробования коэффициента концентрации по ПДК – $K_{пдк} = C_i/ПДК$. Для большинства элементов приняты значения ПДК в водных объектах рыбохозяйственного значения (Нормативы..., 2016). Для элементов, у которых такие значения

не установлены, приняты ПДК для водных объектов хозяйственно-питьевого и культурно-бытового водопользования по ГН 2.1.5.1315-03 (Предельно..., 2003), для U по ГН 2.1.5.2280-07 (Предельно..., 2007). Кроме того, согласно этим гигиеническим нормативам, в расчетах использованы ПДК для Li, Be, Cr, As, Cd и Ba, как более строгие по сравнению с нормативами для рыбохозяйственных водоемов.

Качество природных вод по суммарному загрязнению нормируемыми химическими элементами оценивалось в соответствии с величиной лимитирующего признака вредности компонентов вод $K_p = \sum K_{пдк}$ (Гуляева, 2002).

Проведена оценка качества природных вод и донных отложений реки относительно местного фона для этих сред с использованием существующих методик (Сает и др., 1990; Гуляева, 2002). В каждой точке отбора проб рассчитаны коэффициенты концентрации химических элементов по формуле: $K_c = C_i/C_{фi}$, где C_i – содержание i -го элемента в пробе воды и донных отложений, $C_{фi}$ – соответствующие фоновое содержание элемента.

Фоновый створ на реке заложен согласно установленных норм (Организация..., 2016). Учитывая существенное различие в типе питания реки в момент отбора пробы воды и особенности геологического строения бассейна водосбора для верхней точки Мз 1а относительно остальных точек, в качестве $C_{ф}$ приняты концентрации элементов в воде и в донных отложениях в следующей точке Мз 1, которая также расположена вне влияния явных техногенно нарушенных земель и объектов жизнедеятельности человека.

На основе значений K_c выполнен расчет суммарного показателя загрязнения Z_c по формуле (Сает и др., 1990): $Z_c = \sum K_c - (n - 1)$, где n – число загрязняющих веществ.

Дополнительно к радиоэкологической оценке по валовым концентрациям Th и U в донных отложениях р. Мзымты проведены измерения гамма – спектрометрическим анализом удельной активности (Бк/кг) радионуклидов: ^{226}Ra , ^{228}Ra , ^{224}Ra , ^{232}Th , ^{40}K и ^{137}Cs . Измерения выполнены в Лаборатории изотопных методов АСИЦ ВИМС на полупроводниковом гамма- спектрометре “Ortec-65195-P/DSpecPlus”.

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЙ

Вода

Вода р. Мзымты в летний период, при дождевом и подземном питании, существенно обогащена химическими элементами относительно их средних содержаний в речной воде (Виноградов, 1967; Гордеев, Лисицын, 1978; Гордеев, 1983) (табл. 1). Это относится, как к K_k элементов в от-

Таблица 1. Средние содержания в речной воде (К) по (Виноградов, 1967; Гордеев, Лисицын, 1978; Гордеев, 1983), кларки концентрации (K_k) в точках опробования и средние значения K_{kcp} химических элементов в водах р. Мзымты

Эле- менты	К, мг/дм³	Точки опробования							К _{кр} *
		Мз 1а	Мз 1	Мз 2	Мз 3	Мз 5	Мз 6	Мз 7	
		К _к							
Li	0.0025	0.03	2.04	2.08	2.44	2.92	2.36	4.80	2.77
B	0.02	0.13	0.50	0.95	0.70	0.70	0.60	0.65	0.68
Na	5.0	0.08	0.28	0.20	0.38	0.32	0.34	0.32	0.31
Mg	2.9	0.14	0.69	0.66	0.90	1.03	0.86	1.34	0.91
Al	0.16	0.19	8.13	6.88	10.63	13.75	10.00	19.38	11.46
Si	6.0	0.20	0.50	0.47	0.82	0.95	0.80	1.25	0.80
P	0.04	0.06	3.75	2.48	11.00	8.25	5.00	14.25	7.45
S	3.8	0.16	0.61	0.26	0.45	0.42	0.42	0.42	0.43
K	2.0	0.07	0.23	0.12	0.22	0.39	0.31	0.21	0.24
Ca	12.0	0.43	0.39	0.45	0.69	1.00	1.00	1.33	0.81
Ti	0.003	0.07	2.40	3.67	4.00	5.00	3.67	6.67	4.23
V	0.001	0.36	2.50	2.50	3.30	4.30	3.40	6.20	3.70
Cr	0.001	0.10	1.90	1.60	2.40	4.10	2.30	4.80	2.85
Mn	0.01	0.20	22.00	15.00	21.00	32.00	25.00	55.00	28.33
Fe	0.04	1.35	122.50	95.00	125.00	190.00	130.00	275.00	156.25
Co	0.0003	0.06	6.67	5.67	7.33	10.00	10.00	19.67	9.89
Ni	0.0025	0.04	1.44	1.48	2.04	2.88	2.00	4.40	2.37
Cu	0.007	0.05	0.49	0.44	0.86	1.34	0.91	1.86	0.98
Zn	0.02	0.65	5.00	0.43	1.05	1.95	1.05	1.65	1.86
Ga	0.0001	0.03	4.40	4.00	6.10	7.90	5.60	11.00	6.50
Ge	0.00007	0.07	0.63	0.59	0.80	12.29	0.76	1.17	2.70
As	0.002	0.03	1.30	2.40	1.70	33.50	1.70	2.40	7.17
Rb	0.002	0.10	0.55	0.37	0.50	0.75	0.65	0.80	0.60
Sr	0.05	0.19	0.50	0.62	0.90	1.10	1.10	1.40	0.94
Y	0.0007	0.29	1.39	1.37	3.29	3.57	2.43	5.71	2.96
Zr	0.0026	0.002	0.002	0.011	0.012	0.03	0.009	0.010	0.011
Mo	0.001	0.35	0.10	0.05	0.05	0.11	0.05	0.05	0.07
Ag	0.0002	0.13	3.50	0.13	3.70	0.13	0.13	0.13	1.28
Cd	0.0002	40.00	31.50	0.02	3.45	12.50	13.50	3.30	10.71
Sn	0.00004	0.25	0.68	3.00	0.25	2.48	0.25	0.25	1.15
Sb	0.001	0.01	0.08	0.08	0.12	0.41	0.09	0.09	0.15
Cs	0.00003	0.12	11.33	11.00	14.67	16.00	10.67	21.33	14.17
Ba	0.03	0.14	0.26	0.27	0.33	0.87	0.80	1.33	0.64
La	0.00005	4.40	9.80	8.40	24.00	70.00	20.00	46.00	29.70
Ce	0.00008	1.25	15.00	13.75	38.75	38.75	28.75	78.75	35.63
Pr	0.000007	7.86	25.71	24.29	65.71	68.57	47.14	114.29	57.62
Nd	0.00004	6.00	22.25	21.25	60.00	57.50	42.50	100.00	50.58
Sm	0.000008	7.13	42.50	41.25	123.75	101.25	72.50	175.00	92.71
Eu	0.000001	5.30	90.00	84.00	260.00	200.00	150.00	340.00	187.33
Gd	0.000008	4.38	46.25	46.25	150.00	108.75	76.25	175.00	100.42
Tb	0.000001	5.10	51.00	53.00	160.00	120.00	84.00	210.00	113.00
Dy	0.000005	7.00	50.00	52.00	138.00	124.00	84.00	196.00	107.33
Ho	0.000001	4.70	36.00	41.00	97.00	97.00	63.00	150.00	80.67
Er	0.000004	3.50	21.25	21.75	50.00	60.00	40.00	90.00	47.17
Tm	0.000001	0.50	8.10	10.00	21.00	27.00	17.00	41.00	20.68
Yb	0.000004	1.98	13.50	15.50	27.50	42.50	27.50	65.00	31.92
Lu	0.000001	0.40	6.70	6.90	19.00	20.00	13.00	33.00	16.43
Tl	0.001	0.002	0.017	0.005	0.011	0.008	0.008	0.014	0.010
Pb	0.001	0.15	3.90	3.80	6.00	9.70	4.40	9.30	6.18
Th	0.0001	0.02	0.25	0.51	1.20	0.83	0.33	2.30	0.90
U	0.0005	0.10	0.07	0.07	0.12	0.17	0.10	0.16	0.12

Примечание. Содержания Sc, Br, Se, Nb, Ru, Rh, Pd, In, Te, Hf, Ta, W, Re, Os, Ir, Pt и Au ниже предела обнаружения анализа, * – K_{kcp} без учета содержаний элементов в точке Мз 1а.

Таблица 2. Геохимические формулы вод и донных отложений р. Мзымты

Среда	Химические элементы, ранжированные по убыванию значения $K_{\text{ср}}$				
	>100	>10–100	>1–10	0.1–1	<0.1
Вода	Весенний период, снеговое питание (точка Мз 1а)				
	–	Cd	Pr, Sm, Dy, Nd, Eu, Tb, Ho, La, Gd, Er, Yb, Fe, Ce	Zn, Tm, Ca, Lu, V, Mo, Y, Sn, Mn, Si, Sr, Al, S, Pb, Mg, Ba, B, Ag, Cs, Cr, U, Rb	Na, Ge, Ti, K, Co, P, Cu, Ni, Li, Ga, As, Th, Sb, Tl, Zr
	Летний период, дождевое и подземное питание (точки Мз 1–Мз 7)				
	Eu, Fe, Tb, Dy, Gd	Sm, Ho, Pr, Nd, Er, Ce, Yb, La, Mn, Tm, Lu, Cs, Al, Cd	Co, P, As, Ga, Pb, Ti, V, Y, Cr, Li, Ge, Ni, Zn, Ag, Sn	Cu, Sr, Mg, Th, Ca, Si, B, Ba, Rb, S, Na, K, Sb, U	Mo, Zr, Tl
Донные отложения	Точка Мз 1а				
	Te	Se, Sb	Mo, As, Nb, Zn, Na, Co, Al, Ti, V, Tm, Mg, Ga, Fe	Be, Cr, U, Mn, Dy, Gd, Sc, Bi, Nd, K, W, Pr, Sm, Er, Tb, Ce, Eu, Pb, Y, Ni, Rb, Ho, Yb, Cu, Hf, La, Li, Sr, Ca, Th, Lu, Tl, Ta	Sn, Ba
	Точки Мз 1–Мз 7				
	Te	–	Mo, Nb, As, Zn, Se, Cr, Li, Pb, Ni, Sb, Mn, Bi, V, Al, Sc, Cu, Ga, Fe, K, Rb, Na, Co, Be, Ti, Mg, Eu	W, Gd, Sm, Th, Tb, Dy, Nd, Er, Tl, Ce, Ta, Sr, Pr, Ho, Yb, La, Y, Ca, Lu, U, Tm, Hf	Sn, Ba

Примечание. Содержания ниже предела обнаружения анализа: в воде – Nb, Se, Sc и W; в донных отложениях – Cs, Cd и Ag. Донные отложения не анализировались на P, Ge, Si, B, S, Zr; средние содержания Bi и Be в речной воде в целом не установлены.

дельных точках гидрохимического опробования в интервале Мз 1–Мз 7, так и к средним значениям показателя ($K_{\text{ср}}$) для реки в целом. Значение $\Sigma K_{\text{ср}}$ всех элементов изменяется от 608 до 2294, составляя в среднем 1264.

Общую специализацию вод реки ($K_{\text{ср}} > 1$) в этот период определяют 34 элемента из 51, входящих в геохимическую формулу (табл. 2). В число избыточных элементов с наибольшими значениями $K_{\text{ср}} > 10$ входят все РЗЭ, а также Fe, Mn, Cs, Al и Cd.

Максимальные значения $K_{\text{к}}$ и $K_{\text{ср}}$ имеют Eu, Fe, Tb, Dy и Gd. В число наиболее дефицитных входят Mo, Zr и Tl. В целом для вод р. Мзымты дефицитными являются Th и U, попадающие в группу элементов с $K_{\text{ср}} > 0.1–1$. Для максимальных содержаний этих элементов $K_{\text{к}}$ составляют: Th – 2.30 (точка Мз 7), U – 0.17 (точка Мз 5).

Весной при преимущественно снеговом питании (точка Мз 1а) геохимическую специализацию вод определяют только 14 элементов: РЗЭ (кроме Y, Tm, Lu), Cd и Fe (табл. 2). Значение $\Sigma K_{\text{к}} = 105.78$. Здесь установлены очень низкие со-

держания Th ($K_{\text{к}} = 0.02$) и U ($K_{\text{к}} = 0.1$), а также минимальное значение $\text{Th}/\text{U} = 0.03$.

Содержания подавляющего большинства химических элементов в воде р. Мзымты летом в период дождевого и подземного питания многократно превышают их концентрации в период преобладающего питания реки за счет талых вод.

Ряд элементов, ранжированных по убыванию этого отношения, имеет вид:

>100 – Ga, Mn, Co; >10–100 – Cs, Fe, Li, P, Be, As, Al, Ni, Ti, Ag, Pb, Cr, Eu, Lu, Th, Tm, Ce, Gd, Tb; 1–10 – Cu, Ge, Tl, Zn, Ho, Dy, V, Yb, Sb, Er, Sm, Rb, Bi, Mg, Y, S, B, Nd, Na, K, Pr, Sn, Sr, Si, La, Ba, Zr; <1 – Ca, Cd, U, Mo.

В ряду заметно значительное расхождение позиций Th, входящего в состав группы с величинной отношения >10–100, и U, имеющего в верховьях реки более высокие концентрации при ее снеговом питании. При переходе реки на дождевое и подземное питание содержание Th в воде увеличиваются в 16.67 раз, отношение Th/U – более, чем в 20 раз. Концентрация U летом вниз по течению реки увеличивается (табл. 1).

В точках Мз 1–Мз 7 в летний период, установлены значительные вариации содержаний в воде

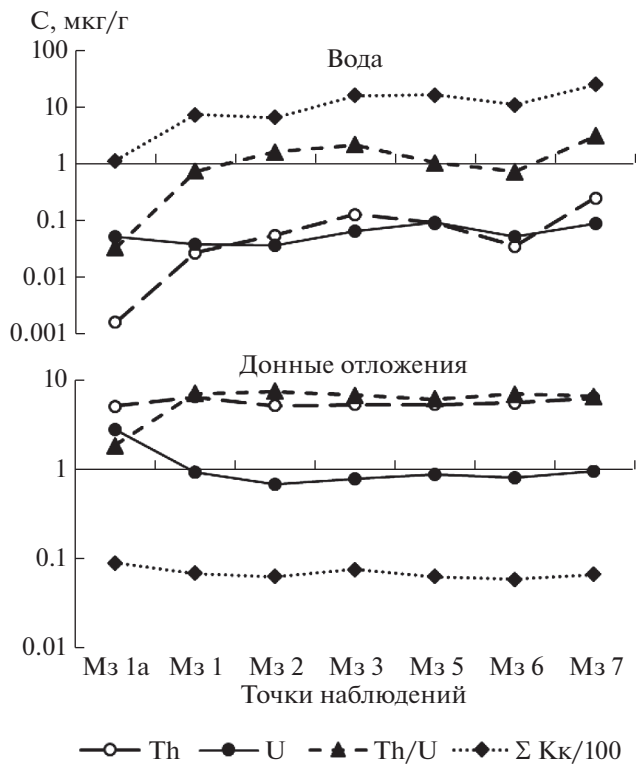


Рис. 2. Содержания (С) Th и U, отношения Th/U и суммы кларков концентраций всех анализируемых элементов ($K_k/100$) в воде и донных отложениях р. Мзымты.

Th от 0.025 до 0.230 мкг/л, при среднем значении (C_{cp}) 0.09 мкг/л (табл. 1, рис. 2). Изменения концентрации U меньше – от 0.034 до 0.086 мкг/л, при $C_{cp} = 0.058$ мкг/л. Отношение Th/U колеблется от 0.67 до 2.84, составляя в среднем 1.45. Графики содержаний радиоактивных элементов и Th/U обнаруживают пологие положительные

тренды вниз по течению реки, в целом повторяющие общий тренд значений ΣK_k всех анализируемых в воде элементов (рис. 2).

Заметно отличие графиков U от графиков Th и Th/U. Их формы говорят о том, что величину Th/U в воде реки в большей степени определяют содержания Th.

В воде реки установлена тесная корреляционная связь Th с 33 химическими элементами, при этом U заметно слабее положительно коррелирует только с 19 элементами (табл. 3). Для них обоих характерна значимая связь с PЗЭ: более тесная ($r > 0.9$) у Th со всеми PЗЭ, кроме La, который, наиболее сильно коррелирует с U. Значимая корреляция между Th и U в водах реки отсутствует.

По аналогии с (Aubert et al., 2002) принято разделение PЗЭ на легкие ЛРЗЭ (La, Ce, Pr, Nd), средние СРЗЭ (Sm, Eu, Gd, Tb, Dy) и тяжелые ТРЗЭ (Ho, Er, Tm, Yb, Lu), как более наглядно отражающее взаимоотношения элементов. К ТРЗЭ относятся также Sc и Y. Содержания Sc практически во всех пробах воды ниже предела обнаружения анализа.

Нормализованные по североамериканскому сланцу (NASC) (Haskin et al., 1968; Gromet et al., 1984) спектры концентраций PЗЭ в водах р. Мзымты в летний период (точки Мз 1–Мз 7) имеют довольно хорошую выдержанность конфигураций и указывают на относительную обогащенность вод СРЗЭ на всем протяжении реки (рис. 3).

В точках Мз 1 и Мз 2 в верховьях реки спектры практически совпадают и далее вниз по течению отмечается общее увеличение содержаний всех PЗЭ.

Заметные и необъяснимые отклонения от общих закономерностей отмечаются для La, в виде резкого скачка концентрации в точке Мз 5, и для спектра в точке Мз 3, в виде непропорциональ-

Таблица 3. Значимые корреляционные связи Th и U в воде и донных отложениях р. Мзымты (r – коэффициент корреляции, критическое значение коэффициента корреляции для 5% уровня значимости $r_{5\% \text{ крит}} = 0.754$)

Радиоактивные элементы	Коэффициенты корреляции					
	$r > 0.9$	$r > 0.8$	$r > 0.754$	$r < -0.754$	$r < -0.8$	$r < -0.9$
В воде						
Th	Ce, Sm, Nd, Tb, Pr, Lu, Ho, Dy, Y, P, Eu, Tm, Er, Gd, Yb	Ni, Li, V, Ga, Al, Co, Cu, Mn, Si, Ti, Fe, Cs, Mg, Cr	Sr, Pb, Ca, Ba	–	–	–
U	La	Cu, Tm, Er, Yb, Pb, Pr, Ca, Y, Lu, Cr	Ho, Nd, Si, Dy, Ce, Ba, Sm, P	–	–	–
В донных отложениях						
Th	–	Ti	Zn, Mo	–	–	–
U	Lu, Y, Yb, Tm, Nb, Na, Hf, Sb, Er, Dy, Ho, Tb	–	Gd, La	Cr, Mg, As	Mn, Ba, Tl, Ni, Rb, Pb, Sc	Fe, Co, V, Cu, Li

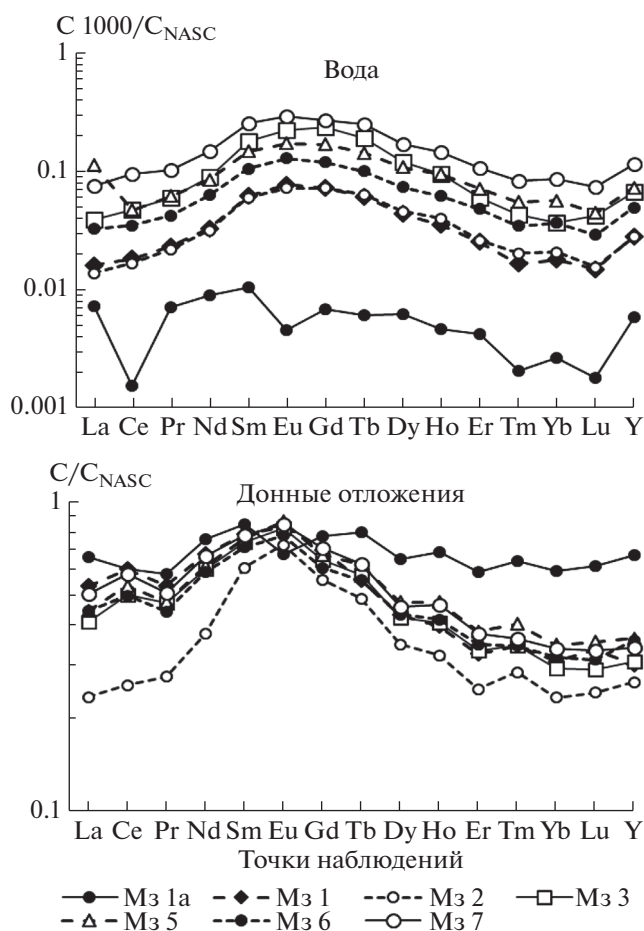


Рис. 3. Спектры концентраций РЗЭ в воде и донных отложениях р. Мзымты, нормализованные по отношению к североамериканскому сланцу (NASC) (Haskin et al., 1968; Gromet et al., 1984).

ных изменений содержания СРЗЭ и ТРЗЭ. По данным весеннего опробования (точка Мз 1а) РЗЭ в водах сильно отличаются от летнего периода формой спектра, указывающего на несколько меньшую степень фракционирования, существенно более бедным составом всех РЗЭ и проявлением цериевого ($\text{Ce}/\text{Ce}^* = 0.21$) и европиевого ($\text{Eu}/\text{Eu}^* = 0.54$) минимумов (рис. 3).

Установленное соотношение сумм нормализованных по NASC концентраций СРЗЭ > ТРЗЭ > ЛРЗЭ в воде в летний период выдержано на всем протяжении реки и в целом повторяет поведение суммы всех РЗЭ (рис. 4).

Данная закономерность нарушается при преимущественно снеговом питании реки, что выражается в общем падении в воде сумм РЗЭ и заметным ослаблением их фракционирования по атомной массе (точка Мз 1а). Графики сумм РЗЭ имеют положительные тренды от истоков к устью реки. В результате факторного анализа содержания элементов в воде р. Мзымты были получены

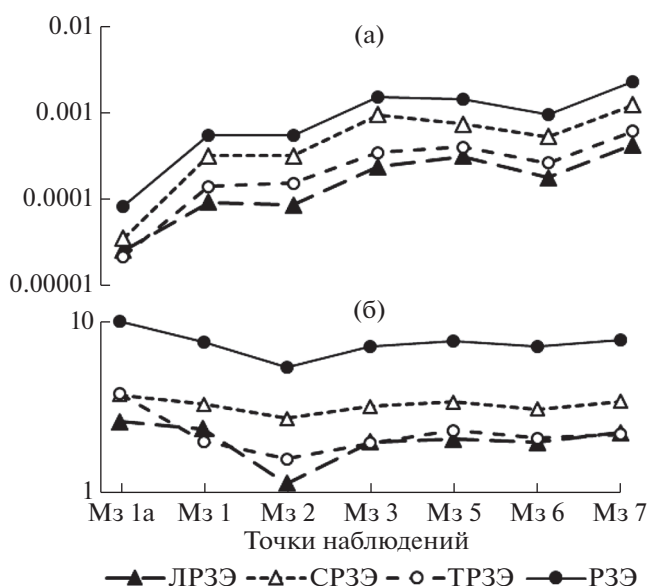


Рис. 4. Суммы концентраций РЗЭ, нормализованных по отношению к североамериканскому сланцу (NASC) (Haskin et al., 1968; Gromet et al., 1984), в воде (а) и в донных отложениях (б) р. Мзымты (ЛРЗЭ — сумма легких РЗЭ; СРЗЭ — сумма средних РЗЭ; ТРЗЭ — сумма тяжелых РЗЭ; РЗЭ — общая сумма элементов).

4 фактора с суммарным вкладом 97.3% дисперсии исходных данных:

Фактор 1 — 80.8% ($\text{Mg}, \text{Tm}, \text{Lu}, \text{Cu}, \text{V}, \text{Cr}, \text{Ce}, \text{Eu}, \text{Ho}, \text{P}, \text{Pb}, \text{Er}, \text{Yb}, \text{Be}, \text{Ni}, \text{Dy}, \text{Al}, \text{Gd}, \text{Tb}, \text{Y}, \text{Sm}, \text{Mn}, \text{Ga}, \text{Rb}, \text{Fe}, \text{Co}, \text{Ti}, \text{Li}, \text{Si}, \text{Sr}, \text{Cs}, \text{Nd}, \text{Th}, \text{Pr}, \text{Na}$) $_{>0.9}$ ($\text{As}, \text{B}, \text{Sb}, \text{K}, \text{La}, \text{Ba}, \text{Tl}, \text{Ge}, \text{S}$) $_{>0.8}$ ($\text{Zr}, \text{Bi}, \text{Ca}$) $_{>0.7}/\text{Mo}_{-0.88}$

Фактор 2 — 6.4% $\text{Ag}_{0.80} \text{Zn}_{0.55} \text{S}_{0.50} \text{Tl}_{0.50}/\text{U}_{-0.65} \text{Ca}_{-0.60} \text{Zr}_{-0.54}$

Фактор 3 — 6.3% $\text{Cd}_{0.94} \text{Zn}_{0.65} \text{U}_{0.52} \text{Bi}_{0.42} \text{Mo}_{0.39}/\text{Sn}_{-0.60}$

Фактор 4 — 3.8% $\text{Sn}_{0.77} \text{Ge}_{0.53} \text{As}_{0.43} \text{Sb}_{0.43}$.

На фактор 1 приходится 80.8% суммарной дисперсии, что существенно выше вкладов в дисперсию остальных 3 факторов, т.е. он отражает основной источник формирования геохимического состава вод р. Мзымты. Вхождение в признаковую структуру этого фактора подавляющего числа анализируемых элементов, обладающих различными миграционными и технофильными свойствами позволяет предположить, что таким источником являются горные породы, составляющие геологическое основание долины реки. Все элементы, за исключением Мо, имеют очень высокие положительные факторные нагрузки >0.7. Из 52-х, включенных в расчеты элементов, в состав фактора 1 не вошли только Sn, Ag, Zn, Cd и U.

Фактор 2, с 6.4% суммарной дисперсии представлен антагонистическим взаимоотношением содержания в воде двух ассоциаций элементов: Ag, Zn, S и Tl, имеющих тесную положительную

Таблица 4. Химические элементы с коэффициентами концентрации по ПДК ($K_{\text{ПДК}}$) более 1 и лимитирующий признак вредности компонентов вод (Кр) р. Мзымты

Элементы	ПДК	Точки опробования						
		Мз 1а	Мз 1	Мз 2	Мз 3	Мз 5	Мз 6	Мз 7
		$K_{\text{ПДК}}$						
Be	0.0002*	0.010	0.550	0.500	0.750	1.200	0.650	1.500
Al	0.04	0.750	32.500	27.500	42.500	55.000	40.000	77.500
V	0.001	0.360	2.500	2.500	3.300	4.300	3.400	6.200
Mn	0.01	0.200	22.000	15.000	21.000	32.000	25.000	55.000
Fe	0.1	0.540	49.000	38.000	50.000	76.000	52.000	110.000
Ni	0.01	0.009	0.360	0.370	0.510	0.720	0.500	1.100
Cu	0.001	0.350	3.400	3.100	6.000	9.400	6.400	13.000
Zn	0.01	1.300	10.000	0.860	2.100	3.900	2.100	3.300
As	0.01*	0.005	0.260	0.480	0.340	6.700	0.340	0.480
Cd	0.001*	8.000	6.300	0.660	0.690	2.500	2.700	0.660
Pb	0.006	0.025	0.650	0.633	1.000	1.617	0.733	1.550
Кр**		12.206	129.119	90.906	130.056	195.672	135.745	273.345

* ПДК элементов для водных объектов хозяйственно-питьевого и культурно-бытового водопользования, остальные — для рыбохозяйственных водоемов; ** включая элементы с $K_{\text{ПДК}} < 1$.

связь с фактором, и U, Ca и Zr с отрицательными факторными нагрузками. Первая группа элементов выделяется максимальными концентрациями в верховьях реки в фоновом створе Мз 1 при дождевом и подземном питании. Это может быть отражением наличия здесь мелких (судя по низким концентрациям S) геохимических аномалий, связанных с рассеянной сульфидной минерализацией в породах геологического основания. Вторая группа элементов с отрицательными нагрузками фактора содержится в воде верховий реки в больших количествах весной при ее питании за счет талых вод. Это позволяет предположить наличие аэральное и, наиболее вероятно, техногенного загрязнения снежного покрова, в частности ураном, и через талые воды — загрязнения реки. Антагонизм обуславливает различие времени года проявления признаков с положительной и отрицательной факторной нагрузкой. Малый вклад в общую дисперсию позволяет говорить о слабом влиянии фактор 2 на химический состав вод.

На фактор 3 приходится 6.3% суммарной дисперсии. В число химических элементов, имеющих положительную связь с фактором, входят Cd, U и Mo, которые в верховьях реки более характерны для весенних талых вод, чем для грунтовых вод в летний период. Кроме того, Cd, Bi и Zn имеют повышенные концентрации в воде в фоновой точке Мз 1 в летний период. Этот фактор отражает наличие в верховьях реки неоднозначно идентифицируемых источников элементов, не связанных с сульфидной минерализацией и отчасти представленных аэральным загрязнением. Отрицательная факторная нагрузка установлена для Sn — элемента, который по результатам опробования вод в летний период характерен для интервалов реки с явным влиянием существующих и строящихся техногенных объектов в среднем и нижнем течении реки.

Фактор 4 имеет незначительный вклад в суммарную дисперсию — 3.8%. Его характеризуют Sn, Ge, As и Sb с повышенными концентрациями в воде реки ниже существующих и строящихся населенных пунктов, рекреационных и спортивных объектов, что позволяет определить этот фактор как антропогенно-техногенный.

Оценка санитарно-гигиенического состояния вод р. Мзымты в летний период 2019 г. показала превышений над ПДК ($K_{\text{ПДК}}$) для водных объектов рыбохозяйственного значения (Нормативы..., 2016): Fe в 38–110, Al в 27–77, Mn в 15–55, Cu в 3.1–13, V в 2.5–6.2, Zn до 10, Pb до 1.62, Ni до 1.1 раз (табл. 4). Превышения ПДК для объектов хозяйственно-питьевого и культурно-бытового водопользования (Предельно..., 2003): As до 6.7, Cd до 6.3 и Be до 1.5 раз.

В весенний период в верховьях реки при преимущественно снеговом ее питании $K_{\text{ПДК}} > 1$ установлен только для Cd — 8 и Zn — 1.3 (табл. 4). Суммарное загрязнение воды в летний период по величине лимитирующего признака вредности компонентов Кр (Гуляева, 2002) на всем протяжении реки, за исключением точки Мз 2, соответствует особо опасной степени загрязнения ($Kр > 100$) (табл. 4). В точке Мз 2 показатель $Kр = 90.9$, что отвечает опасной степени загрязнения.

Высокое значение показателя $Kр = 129.1$ установлено в верховьях р. Мзымты в точке Мз 1, содержания химических элементов в которой для летнего периода приняты за местный фон (рис. 5).

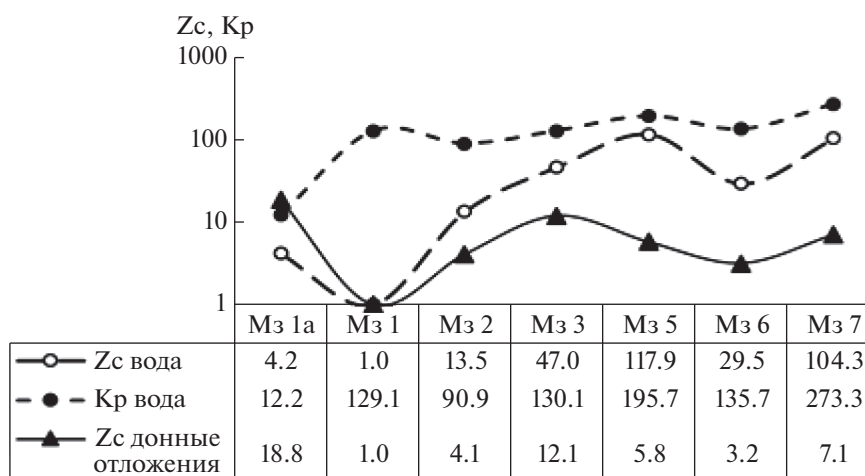


Рис. 5. Качество воды и донных отложений р. Мзымты в точках опробования (Мз 1а–Мз 7) по суммарным показателям загрязнения Кр и Zc.

Далее вниз по течению показатель Кр имеет общий положительный тренд и достигает максимального значения Кр = 273.3 в точке Мз 7, в 5 км выше устья реки на окраине г. Адлер, в жилом частном секторе Молдовка (рис. 1).

Повышенное значение показателя Кр = 195.7 установлено в точке Мз 5 ниже по течению реки от туристического комплекса Красная Поляна, населенных пунктов Эстосадок, Чвижепсе, Кепша и впадения крупных правобережных притоков (рис. 1, 5).

Ряды элементов, вносящих основной вклад в суммарное загрязнение вод реки ($K_{\text{ПДК}} \geq 1$) при дождевом и подземном питании и ранжированных по убыванию $K_{\text{ПДК}}$ в точках опробования, имеют вид:

Мз 1 Fe–Al–Mn–Zn–Cd–Cu–V; Мз 2 Fe–Al–Mn–Cu–V; Мз 3 Fe–Al–Mn–Cu–V–Zn–Pb;

Мз 5 Fe–Al–Mn–Cu–As–V–Zn–Cd–Pb–Be; Мз 6 Fe–Al–Mn–Cu–V–Cd–Zn;

Мз 7 Fe–Al–Mn–Cu–V–Zn–Pb–Be–Ni.

Во всех рядах присутствуют Fe, Al, Mn, Cu и V, сохраняющие взаимный порядок в точках опробования. Дополнительные сверхнормативные элементы в рядах – Zn, Cd, Pb, As, Be и Ni имеют невыдержанные концентраций по течению реки. При снеговом питании (точка Мз 1а) качество воды в верховьях р. Мзымты по показателю Кр = 12.2 (табл. 4) соответствует опасной степени загрязнения, слабо превышая нижний порог этой категории (Кр = 10–100) (Гуляева, 2002). Основные сверхнормативные элементы летнего периода при питании реки талыми водами имеют $K_{\text{ПДК}} < 1$ и обнаруживают иной приоритетный порядок (табл. 4).

Качество воды р. Мзымты относительно местного гидрохимического фона по суммарному показателю загрязнения Zc в точках Мз 3, Мз 5 и Мз 7 (рис. 5) отвечают очень высокому уровню загрязнения ($Zc > 32$) (Саеи и др., 1990). Максимальное значение Zc = 117.9 для вод реки, совпадающее с повышенным значением показателя Кр, обнаружено в точке Мз 5 ниже от техногенных источников и крупных притоков (рис. 1). Все химические элементы здесь, кроме S, Zn, Ag, Cd, Tl и Bi, имеют значения коэффициента концентрации $K_c > 1$. В состав основных загрязнителей воды входят: со значениями $K_c > 10$ – As, Ge, Zr; со значениями $K_c > 3.0$ – Sn, Sb, Ba, La, Tm, Yb и Th.

Вода реки в период таяния снега относительно летнего гидрохимического фона имеет значение Zc = 4.22, что соответствует слабому загрязнению (Zc 4–8) (Саеи и др., 1990). Значения $K_c \geq 1$ установлены у Mo – 3.5, U – 1.36, Cd – 1.25, Ca – 1.09, Zr – 1.0.

Содержание в воде р. Мзымты U во всех точках опробования ниже ПДК (Предельно..., 2007) более, чем на 2 порядка. Максимальные превышения над фоном для Th отмечено в точке Мз 7 – $K_c = 9.20$, для U в точке Мз 5 – $K_c = 2.39$.

ДОННЫЕ ОТЛОЖЕНИЯ

Анализ геологического строения бассейна р. Мзымты показывает существенное различие горных пород, слагающих самое ее верховье, выше точки Мз 1а – граниты и габбро-диориты, и остальной части бассейна – преимущественно осадочные породы с очень незначительным количеством магматических образований (Лаврищев и др., 2002). Соответственно концентрации большинства химических элементов в донных отложениях верховья реки близки к их средним со-

держаниям в магматических породах, остального бассейна — к средним содержаниям в осадочных горных породах верхней части континентальной коры (Grigoriev, 2003). Это находит отражение в низких значениях K_k и их малом размахе (табл. 5). Подавляющее число элементов в отложениях реки имеют значения $K_{k,ср}$ от 0.3 до 3, слабо варьируют значения ΣK_k — от 59.7 до 76.2.

Общую геохимическую специализацию ($K_{k,ср} > 1$) донных отложений р. Мзымты, образующихся за счет магматических пород в точке Мз 1а определяют 16 элементов. В остальной части бассейна, сложенной преимущественно осадочными

породами — 27 элементов (табл. 2). В число последних входят 15 элементов из числа избыточных в продуктах разрушения магматических пород, исключение составляет Тм. Для донных отложений Th и U с $K_k < 1$ являются дефицитными на всем протяжении реки.

Составлена формула, в числителе которой находятся элементы по убыванию приоритетности, характерные для территории, сложенной магматическими породами (точка Мз 1а), в знаменателе — с преобладанием осадочных пород (точки Мз 1—Мз 7):

$$\frac{U, Se, Na, Nb, Y, Lu, Yb, Hf, Tm, Er, Sb, Ho, La, Dy, Tb, Pr, Nd, Ce, Gd, Be, Sn, Sm, Ta, Mo}{Li, As, Cr, Ni, Cu, Ba, Ca, Mn, Pb, Co, Te, V, Sc, Fe, Ti, Rb, Mg, Zn, Sr, W, Bi, K, Ti, Al, Eu, Th, Ga}$$

Несмотря на более высокие содержания U в целом в осадочных породах и особенно в глинистых сланцах, в том числе на Кавказе (Асварова, 2006), он вошел в группу элементов характерных для территории, сложенной магматическими породами.

Gromet et al., 1984) спектры РЗЭ в донных отложениях р. Мзымты на территории, сложенной преимущественно осадочными породами (точки Мз 1—Мз 7) указывают на резкую относительную обогащенность отложений СРЗЭ (рис. 3). Спектры для точек Мз 1, Мз 3—Мз 7 образуют очень тесную группу с колебаниями внутри на уровне точности анализа. Непонятно значительное отклонение от общих закономерностей спектра в точке Мз 2, указывающее на более контрастное преобладание СРЗЭ относительно остальных РЗЭ и наличие более выраженного европиевого максимума ($Eu/Eu^* = 1.24$). Спектр РЗЭ в донных отложениях территории, сложенной магматическими породами (точка Мз 1а), отражает меньшую степень фракционирования элементов и проявление европиевого минимума ($Eu/Eu^* = 0.84$). Установленное соотношение сумм нормализованных по NASC концентраций СРЗЭ $> TPЗЭ \approx LPЗЭ$ в донных отложениях реки выдержано в точках Мз 1, Мз 3—Мз 7 и в целом повторяет поведение суммы всех РЗЭ (рис. 4). Данная закономерность нарушается в точке Мз 1а — преобладание суммы ТРЗЭ, и в точке Мз 2 — резким минимумом ЛРЗЭ. Графики сумм РЗЭ не имеют трендов от истоков к устью реки.

Корреляционным анализом в донных отложениях р. Мзымты установлена тесная положительная связь U с 11 РЗЭ, Na, Hf и Sb (табл. 3). Th положительно коррелирует только с 3 элементами — Ti, Zn и Mo. Значимая зависимость между U и Th отсутствует.

Нормализованные по североамериканскому сланцу (NASC) (Haskin et al., 1968);

В результате факторного анализа концентраций элементов в донных отложениях р. Мзымты были получены 4 основных фактора. суммарный вклад которых составил 96.3% дисперсии исходных данных:

Фактор 1 — 64.6% (Ba, Li, Rb, Tl, Co, As, Cu, Mn, V, Pb, Fe, Sc, Te) $_{>0.9}$ (Ni, K, Al, Cr, Zn) $_{>0.8}$ (Mg, Bi) $_{>0.7}$ (Sr, Eu, W) $_{>0.5}$ (Y, Yb, Tm, Lu, U, Dy, Er, Nb, Ho, Hf, Tb) $_{<-0.9}$ (Na, Sb) $_{<-0.8}$ (Gd, La, Sm) $_{<-0.7}$ (Nd, Pr) $_{<-0.6}$ (Ce, Se) $_{<-0.5}$

Фактор 2 — 16.6% (Ti, Th) $_{<-0.8}$ (Ce, Eu, Mo) $_{<-0.70}$ (Pr, Nd, Ta, Sm, La, Ca) $_{<-0.6}$ (Sn, Gd) $_{<-0.5}$

Фактор 3 — 9.6% Be $_{0.80}$ Ga $_{0.78}$ Bi $_{0.61}$ Ta $_{0.57}$ /Sr $_{-0.64}$ Ca $_{-0.63}$

Фактор 4 — 5.5% Rh $_{0.85}$ W $_{0.67}$ Sn $_{0.60}$.

На фактор 1 приходится 64.6% суммарной дисперсии геохимического состава донных отложений, что более, чем в 2 раза превышает вклад в дисперсию остальных 3 факторов. Фактор представлен антагонистическим взаимоотношением элементов, характерных для донных отложений территорий, сложенных преимущественно осадочными породами, имеющих тесную положительную связь с фактором, и элементов, более типичных для донных отложений, образующихся за счет магматических пород, с отрицательными факторными нагрузками. Это позволяет сделать вывод, что суммарную дисперсию состава донных отложений р. Мзымты на 64.6% определяет различие горных пород, слагающих бассейн денудации, на уровне осадочные — магматические породы.

Анализ установил различное влияние фактора 1 на U и Th. Значение факторной нагрузки Th очень низко, что говорит о его индифферентном отношении к фактору 1.

Таблица 5. Средние содержания в осадочных (I) и магматических (II) породах (K) (Grigoriev, 2003), кларки концентрации (K_K) и средние значения $K_{кр}$ элементов в донных отложениях р. Мзымты. (Содержания Pd, Ag, Cd, Cs, Re, Ir, Pt, Au ниже предела обнаружения анализа)

Элементы	K, г/т		Точки наблюдений							K _{кр} *
			Мз 1а	Мз 1	Мз 2	Мз 3	Мз 5	Мз 6	Мз 7	
	I	II	K _к							
Li	33	32	0.44	2.35	2.60	2.21	2.17	2.02	2.04	2.23
Be	1.9	2.9	0.98	1.39	1.48	1.26	1.12	1.08	1.25	1.26
Sc	9.6	11	0.77	1.92	1.74	1.75	1.91	1.56	1.48	1.73
V	91	75	1.14	2.07	1.87	1.84	1.84	1.69	1.74	1.84
Cr	58	37	0.88	2.14	2.07	2.85	3.32	2.15	3.52	2.67
Co	14	6.8	1.25	1.34	1.46	1.33	1.26	1.14	1.41	1.32
Ni	37	30	0.53	1.74	1.96	2.02	1.99	1.74	2.79	2.04
Cu	31	24	0.48	1.53	1.84	1.65	1.66	1.61	1.86	1.69
Zn	43	53	1.61	3.82	3.15	3.12	2.83	2.74	3.58	3.21
Ga	12	18	1.07	1.84	1.77	1.68	1.54	1.51	1.50	1.64
As	7.6	1.7	3.15	3.91	4.95	4.88	2.43	2.79	2.89	3.64
Se	0.27	0.072	27.08	1.11	1.11	10.93	1.11	1.11	1.11	2.75
Rb	94	150	0.52	1.50	1.65	1.41	1.24	1.25	1.40	1.41
Sr	270	260	0.39	0.49	0.53	0.56	0.69	0.63	0.60	0.58
Y	29	43	0.54	0.36	0.31	0.37	0.43	0.43	0.41	0.38
Nb	7.6	20.5	3.07	4.50	2.58	3.92	4.12	3.96	4.29	3.89
Mo	1.5	1.4	6.68	6.93	5.01	5.77	5.65	6.16	6.41	5.99
Rh**	н.д.***	н.д.	н.д.	0.91	1.11	0.77	0.88	1.07	26.9	н.д.
Sn	2.9	5.1	0.04	0.07	0.05	0.06	0.05	0.05	0.11	0.06
Sb	1.2	0.22	18.45	2.17	2.14	1.95	1.82	1.88	1.93	1.98
Ba	410	650	0.00	0.02	0.02	0.01	0.01	0.01	0.02	0.02
La	32	45	0.46	0.52	0.23	0.40	0.43	0.43	0.49	0.41
Ce	52	70	0.57	0.77	0.33	0.64	0.68	0.63	0.75	0.63
Pr	6.8	6.9	0.66	0.62	0.31	0.54	0.55	0.51	0.58	0.52
Nd	24	28	0.73	0.77	0.43	0.69	0.70	0.67	0.75	0.67
Sm	5.5	7.4	0.63	0.79	0.62	0.75	0.77	0.72	0.79	0.74
Eu	0.94	1.4	0.56	1.03	0.90	1.02	1.07	0.97	1.05	1.01
Gd	4	5.2	0.77	0.90	0.72	0.84	0.87	0.79	0.92	0.84
Tb	0.69	1.1	0.61	0.68	0.59	0.71	0.77	0.68	0.77	0.70
Dy	3.6	4.8	0.78	0.69	0.56	0.68	0.76	0.69	0.73	0.68
Ho	0.92	1.4	0.51	0.45	0.36	0.46	0.53	0.47	0.52	0.46
Er	1.7	3.2	0.63	0.64	0.49	0.66	0.76	0.69	0.75	0.66
Tm	0.78	0.29	1.10	0.22	0.18	0.22	0.26	0.22	0.23	0.22
Yb	2	3.7	0.49	0.47	0.36	0.44	0.53	0.48	0.51	0.46
Lu	0.44	0.9	0.31	0.34	0.25	0.30	0.36	0.32	0.34	0.32
Hf	3.9	3.4	0.47	0.26	0.16	0.21	0.23	0.22	0.24	0.22
Ta	1	3	0.21	0.72	0.50	0.56	0.55	0.58	0.63	0.59
W	2	1.9	0.67	0.92	1.27	0.60	0.76	0.68	1.12	0.89
Tl	0.89	1.4	0.24	0.67	0.81	0.66	0.57	0.55	0.64	0.65
Pb	12	20	0.56	2.26	2.19	2.14	1.78	1.77	2.30	2.07
Bi	0.26	0.47	0.77	2.15	1.96	2.08	1.50	1.58	1.92	1.87
Th	7.7	14	0.36	0.84	0.66	0.68	0.69	0.71	0.81	0.73
U	3.4	3.2	0.87	0.27	0.20	0.23	0.26	0.24	0.28	0.25
Na	13100	26100	1.54	1.50	1.40	1.52	1.44	1.36	1.12	1.39
Mg	18300	10400	1.08	0.97	0.95	1.17	1.25	0.97	0.87	1.03
Al	64100	77400	1.18	1.92	1.91	1.77	1.67	1.58	1.59	1.74
K	19800	29800	0.72	1.54	1.73	1.45	1.34	1.31	1.29	1.44
Ca	72800	20500	0.38	0.16	0.16	0.24	0.44	0.41	0.55	0.33
Ti	3740	2870	1.15	1.33	0.94	1.12	1.17	1.09	1.20	1.14
Mn	830	690	0.79	1.49	2.70	2.24	2.05	1.49	1.87	1.97
Fe	35400	29700	1.02	1.74	1.60	1.70	1.57	1.36	1.55	1.59

* $K_{кр}$ без учета содержания элементов в точке Мз 1а; ** абсолютные содержания в г/т, в связи с отсутствием данных о средних содержаниях в горных породах; *** нет данных.

Таблица 6. Удельная активность естественных и техногенных радионуклидов в донных отложениях р. Мзымты

Номера точек	Удельная активность, Бк/кг ($\pm \Delta$, абсолютист погрешность измерений, $P = 0.95$)					
	^{226}Ra	^{228}Ra	^{224}Ra	$^{232}\text{Th}^*$	^{40}K	^{137}Cs
Мз 1а	38 ± 9	33 ± 12	32 ± 6	33 ± 12	441 ± 72	23 ± 4
Мз 1	28 ± 4	37 ± 5	37 ± 5	37 ± 5	596 ± 71	<10
Мз 2	36 ± 10	53 ± 19	53 ± 11	53 ± 19	679 ± 109	<10
Мз 3	32 ± 5	39 ± 8	38 ± 6	39 ± 8	538 ± 74	<10
Мз 5	27 ± 4	31 ± 6	30 ± 5	31 ± 6	576 ± 73	<10
Мз 6	25 ± 5	30 ± 8	39 ± 6	30 ± 8	509 ± 71	<10
Мз 7	27 ± 3	38 ± 5	40 ± 5	38 ± 5	559 ± 65	<10

* Значение удельной активности ^{232}Th рассчитано по удельной активности ^{228}Ra , исходя из допущения радиоактивного равновесия с членами ряда ^{232}Th .

Фактор 2 с 16.6% суммарной дисперсии характеризуют только химические элементы, имеющие с ним отрицательную связь. В признаковую структуру фактора вошли элементы, не имеющие значащих связей с фактором 1, либо имеющие низкие положительные или отрицательные нагрузки этого фактора. Все элементы, характеризующие фактор, занимают последние места в выше приведенных приоритетных рядах по геологическим условиям образования донных отложений. Это позволяет предположить, что фактор 2 отражает отсутствие определяющей зависимости этих элементов от типа горных пород в бассейне денудации. В их число вошел Th.

На фактор 3 приходится 9.6% суммарной дисперсии. В число химических элементов, имеющих положительную связь с фактором, входят Be, Ga, Bi, Ta, которые являются типоморфными для гранитов. Отрицательную связь с фактором имеют Sr и Ca наиболее характерные для карбонатных пород и базитов. Таким образом, фактор 3 отражает наличие в геохимическом поле долины реки антагонизма между продуктами разрушения кислых и основных (карбонатных) пород.

Фактор 4, имеет малый вклад в суммарную дисперсию — 5.5%. Его характеризуют элементы Rh, W и Sn, для которых характерны повышенные концентрации в донных отложениях реки ниже существующих и строящихся техногенных объектов, в том числе максимальные концентрации в точке Мз 7 на окраине г.Адлер (табл. 5). Содержание Rh в донных отложениях реки в этой точке составляет 26.9, при Сф — 1.11 г/т. Таким образом фактор 4 может быть интерпретирован как антропогенно-техногенный.

Оценка качества донных отложений р. Мзымты относительно местного геохимического фона (точка Мз 1) показала, что для подавляющего числа элементов во всех точках значение Кс не превышает 1.5. Максимальные значения Кс уста-

новлены для Se в точках Мз 1а и Мз 3 (соответственно 6.50 и 9.83) и Са в точка Мз 7 — 3.35. Уровень суммарного загрязнения донных отложений по показателю Zс (Саеи и др., 1990) в точках Мз 2, Мз 5—Мз 7 слабый, а в точках Мз 1а и Мз 3 — средний (рис. 5).

Донные отложения реки имеют незначительные колебания концентраций Th от 5.08 до 6.45 г/т (рис. 2), в среднем (Сср) 5.57 г/т. Для U наблюдается резкое относительное повышение содержания в точке Мз 1а до 2.76 г/т, и существенно более низкие и выдержанные концентрации ниже по течению реки — от 0.69 до 0.96 г/т, при Сср = 0.84 г/т. Соответственно отношение Th/U в точке Мз 1а имеет резко пониженное значение — 1.83, далее изменяется мало от 6.1 до 7.4, составляя в среднем 6.76.

В донных отложениях р. Мзымты установлен сравнительно небольшой размах значений удельной активности естественных радионуклидов: ^{226}Ra — 25–38; ^{228}Ra — 31–53; ^{224}Ra — 32–53, ^{232}Th — 30–53; ^{40}K — 441–679 Бк/кг (табл. 6). Значащее содержание радионуклида ^{137}Cs , равное 23 ± 4 Бк/кг, обнаружено только в точка Мз 1а в самом верховье реки (табл. 6). Предположительно загрязнение территории ураном аэральное.

ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ

Содержания подавляющего большинства химических элементов в водах р. Мзымты летом многократно превышают их концентрации в период снегового питания. Так содержание Th увеличиваются в сравнении с весенним периодом в 16.67 раз, отношение Th/U — более, чем в 20 раз. Концентрации U подвержены сезонным колебаниям в меньшей степени, имеют более высокие значения в верховьях реки при ее снеговом питании. При значительных сезонных колебаниях геохимический состав вод реки характеризуется

постоянными повышенными относительно средних содержаний в речной воде (Виноградов, 1967; Гордеев, Лисицын, 1978; Гордеев, 1983) концентрациями РЗЭ (Y, Tm, Lu только летом), Cd и Fe. При этом содержания РЗЭ, степень их фракционирования и конфигурации спектров, соотношений суммы СРЗЭ, ТРЗЭ и ЛРЗЭ значительно изменяются в зависимости от сезона.

Сезонным изменениям подвержено качество воды р. Мзымты по нормируемым показателям. В летний период превышения над ПДК ($K_{\text{ПДК}}$) наблюдаются по Fe, Al, Mn, Cu, V, Zn, Pb, Ni, As, Cd и Be. Весной — только по Cd и Zn. Суммарное загрязнение по величине лимитирующего признака вредности компонентов Кр летом почти на всем протяжении реки соответствует особо опасной степени загрязнения ($K_p > 100$), в весенний период отмечено слабое превышает нижнего порога опасной категории загрязнения. Основные сверхнормативные элементы летнего периода — Fe, Al, Mn, Cu и V при питании реки талыми водами имеют $K_{\text{ПДК}} < 1$.

Аналогичны результаты оценки качества воды р. Мзымты относительно местного гидрохимического фона по суммарному показателю загрязнения Zc.

Суммарное загрязнение воды в целом нарастает от фонового створа в точке Мз 1 к устью реки со значительным падением загрязнения в точке Мз 6. Последнее может быть связано с широким развитием в геологическом основании реки между точками Мз 5 и Мз 6 юрских известняков, способных увеличивать щелочные барьерные свойства вод на пути водной миграции элементов. В районе точки Мз 6 река выходит на Адлерскую низменность с уклоном русла < 0.0055 , что приводит к быстрому снижению скорости течения с возможным выпадением в осадок элементов на механическом барьере.

Особенности геохимического состава донных отложений р. Мзымты определяют в основном горные породы, обнажающиеся в ее бассейне: граниты и габбро-диориты выше точки Мз 1а в верховье реки и ниже до устья преимущественно осадочные породы. При этом элементы разделились на две основные группы по преобладанию в отложениях реки на указанных территориях с различным геологическим строением.

Концентрации большинства химических элементов в донных отложениях близки к их средним содержаниям в осадочных горных породах верхней части континентальной коры (Grigoriev, 2003), имеющих наибольшее распространение на площади водосбора. Это определяет, в отличие от вод, низкие значения K_k этих элементов.

Схожесть геохимической специализации донных отложений и вод р. Мзымты в летний период выражается во вхождении в число избыточных:

Fe, Mn, Al, Co, As, Ga, Pb, Ti, V, Y, Cr, Li, Ni, Zn. При этом Fe, Mn и Al в воде входят в число приоритетных с значениями $K_k > 10$, а остальные в обеих средах имеют значения K_k одного порядка — от 1 до 10. Дефицитными в воде и донных отложениях являются Sr, Mg, Th, Ca, Ba, U и Tl.

Основное отличие заключается в уровне значений K_k для РЗЭ, которые определяют геохимическую специализацию воды реки, но входят в число дефицитных для донных отложений. В то же время приоритетные в отложениях реки Mo, Cu, Rb, Na, K и Sb, в воде являются дефицитными.

При очень высоком уровне суммарного загрязнения вод р. Мзымты по показателю Zc в летний период, уровень загрязнения донных отложений относительно местного геохимического фона в основном слабый, редко — средний. В период подготовки олимпийского строительства в 2009 г отложения реки также имели низкие содержания тяжелых металлов (Отчет..., 2010).

Основной причиной такого несоответствия, наиболее вероятно, являются слабые сорбционные способности донных отложений в связи с низкими содержаниями в них органического и тонкодисперсного минерального веществ.

Результаты факторного анализа указывают на то, что 80.8% общей дисперсии геохимического состава вод р. Мзымты обусловлены единым источником, которым являются слагающие бассейн горные породы в целом, без разделения их на осадочные и магматические. Три фактора с 3.8–6.4% суммарной дисперсии в той или иной степени связаны с сезонностью поступления элементов в воду, литохимическими аномалиями и антропогенно-техногенным воздействием.

Для донных отложений реки 64.6% суммарной дисперсии геохимического состава определяет различие состава горных пород, слагающих бассейн реки, на уровне осадочные — магматические породы. 16.6% суммарной дисперсии отражает наличие элементов с отсутствием определяющей зависимости от типа горных пород в бассейне денудации. 9.6% суммарной дисперсии связано с наличием в геохимическом поле долины реки продуктов разрушения кислых и основных (карбонатных) пород.

Геохимический состав вод р. Мзымты, в сравнении с составом донных отложений, в значительно меньшей степени зависит от различия горных пород, слагающих конкретные участки бассейна денудации. Вклад в дисперсию состава вод и донных отложений реки антропогенных факторов носит ограниченный характер.

Поступление химических элементов в реки Кавказа за счет ионного стока с водосборной площади существенно преобладает в горной части бассейна над предгорным и равнинным участками.

ми (Никаноров, 2001). Исходя из этого, можно было ожидать в летний период постепенного снижения в воде р. Мзымты концентраций элементов в направлении от верховья к устью за счет разбавления речных вод метеорными. Однако исследования показали общий положительный тренд вниз по течению содержаний большинства химических элементов в воде, включая Th и U.

Существенное увеличение в 2019 г загрязнения вод р. Мзымты в сравнении с периодом подготовки к Зимним Олимпийским играм 2014 г. (Отчет..., 2010; Гордеев и др., 2015) позволяет предположить появление в долине реки новых источников элементов в результате строительства олимпийских объектов и в более поздний период.

Спектры РЗЭ, нормализованных по NASC, и соотношение сумм $CPЗЭ > TPЗЭ > LPЗЭ$ в воде реки в летний период выдержаны на всех ее участках с общим положительным трендом от верховий к устью реки. Достаточно хорошая выдержанность спектров и сумм РЗЭ установлена и в донных отложениях реки, но без явных трендов. Изменения концентраций в водах основных загрязнителей — Fe, Al, Mn, Cu и V, подчинены единым закономерностям, с близкой реакцией на изменяющиеся условия миграции и положительным трендом вниз по течению. Дополнительные загрязнители — Zn, Cd, Pb, As, Be и Ni, наиболее вероятно, связаны с антропогенной деятельностью.

Миграционная подвижность U выше, чем у Th (Перельман, 1975), поэтому типичной ситуацией в природе является более высокие содержания в водах рек U относительно Th (Шварцев, 1998; Рихванов, 2004).

В летний период в воде р. Мзымты ниже скопления существующих или строящихся техногенных объектов установлены превышения содержаний Th над U. Характер колебаний значений Th/U обусловлен в основном изменениями содержания Th.

Концентрация радиоактивных элементов в донных отложениях и отношение Th/U вблизи областей сноса отражают состав горных пород, подвергшихся выветриванию (Титаева, 2005). Следовательно, установленные повышенные значения Th/U (от 6.1 до 7.4) в донных отложениях р. Мзымты позволяют предположить такие же высокие значения отношения Th/U и в источнике материала для донных отложений. Следствием этого могут быть повышенные содержания Th относительно U в подземных водах, поступающих в реку с ближайших склонов, и, как результат, аномально высокие значения Th/U в водах реки с определяющей ролью Th.

Объяснение проявлению доминирующего воздействия на состав вод р. Мзымты источников, расположенных на ближайших склонах ее долины, можно найти в существующем представлении в

теории поисковой геохимии о преобладающей роли в составе отложений водотоков больших порядков материала ближайших склонов (Соловов, 1985), которое, на наш взгляд, можно применить и к преобладающему влиянию грунтовых вод с ближайших склонов на состав вод реки.

Выделено три основных типа источников поступления химических элементов в воду р. Мзымты: природные, природно-техногенные и антропогенно-техногенные.

Природные источники развиты на всем протяжении реки и вносят наибольший вклад в геохимический состав вод. Они представлены, с учетом результатов факторного анализа и наличия загрязнения вод в верховьях реки, выше всех техногенных объектов, горными породами, слагающими бассейн реки.

Природно-техногенные источники, определяющие рост содержаний химических элементов, в том числе Th и U, в среднем и нижнем течении реки, связаны с наличием на ближайших склонах долины техногенных объектов, сложенных местными горными породами, включая перемещенные грунты, подверженным интенсивному техногенному преобразованию и выветриванию с выносом химических элементов.

В качестве природно-техногенных источников химических элементов в воде реки выступают олимпийские объекты на курорте Красная Поляна, строящиеся горнолыжные объекты в окрестностях Роза Хутор, совмещенные автомобильная и железнодорожная трассы “Адлер-Роза Хутор”, появившиеся в долине р. Мзымты в период подготовки Зимних Олимпийских игр 2014 г. в г. Сочи и в более позднее время. Все они включают лишённые почвенно-растительного слоя, сложенные размельчёнными горными породами техногенные площадки и осыпи, дорожные, железнодорожные и иные строительные насыпи, широко развитые по бортам реки ниже точки Мз 2 до ее устья.

Таким образом, в среднем и нижнем течении река подвержена одновременному воздействию природных и природно-техногенных источников, практически не отличающихся по качественному составу поставляемых в природные воды элементов. Они определяют 80.8% общей дисперсии геохимического состава вод р. Мзымты. Наличие источников второго типа проявляется в увеличении общего уровня содержаний элементов в воде и формировании их положительного тренда вниз по течению.

Источники третьего типа связаны с продуктами жизнедеятельности и производственной деятельности человека, которые не всегда очевидны и вносят ограниченный вклад в загрязнение вод.

Факторный анализ показал существенное различие в поведении Th и U как в воде, так и в донных отложениях р. Мзымты, что выражается в от-

сутствии совместного вхождения этих элементов в признаковую структуру хотя бы одного фактора.

Имеются сведения, что в зонах влияния гордов атмосферные осадки резко обогащены ураном (Рихванов, 2004). Учитывая это, можно предположить, что одной из причин скачка содержания Th и увеличение концентраций U в воде реки на окраине г. Адлер, при отсутствии соответствующего роста их количества в донных отложениях, является влияние агломерации Сочи—Адлер.

В точках опробования донных отложений р. Мзымты измеренные величины удельной активности естественных радионуклидов, как правило, не выходит за пределы значений для горных пород Краснодарского края: Ra $< 1-46$, ^{232}Th $11-45$, ^{40}K $160-547$ Бк/кг (Панюшкина, Нагалеvский, 2007). Исключения составляет точка Мз 3, ниже комплекса Красная Поляна, где установлены незначительные превышения над фоном.

Известно, что ^{137}Cs не должны содержать загрязненные природные объекты даже в микроскопических количествах. Выявленное повышенное значение удельной активности этого радионуклида (23 ± 4 Бк/кг) в донных отложениях верховья р. Мзымты обусловлено техногенной нагрузкой на экосистему реки.

Наши данные согласуются с результатами радиационного обследования Росгидромета участка дороги Красная Поляна—Роза Хутор в 2009 г. (Справка..., 2009). Тогда на техногенной площадке строящейся дороги отмечено повышенные содержания естественных радионуклидов по сравнению с местными целинными участками: ^{226}Ra — 34, ^{232}Th — 52 и ^{40}K — 800 Бк/кг. В ненарушенных почвах участка на глубине до 10 см была установлена удельная активность ^{137}Cs , равная 35–40 Бк/кг, что было объяснено чернобыльским загрязнением. Все указанные выше значения удельной активности ^{137}Cs значительно ниже нормы — 0.1 Бк/г, установленной СП 2.6.1.2612-10 (Основные..., 2010) для неограниченного использования твердых материалов.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Геохимический состав воды р. Мзымты подвержен резким сезонным изменениям. Общую специализацию вод реки относительно их средних содержаний в речных водах (Виноградов, 1967; Гордеев, Лисицын, 1978; Гордеев, 1983) летом при дождевом и подземном питании определяют 34 элемента, весной при снеговом питании только 14. С переходом от весеннего к летнему питанию концентрация элементов в воде увеличивается на 1–2 порядка. Содержания в воде реки большинства элементов, включая Th и U, обнаруживают пологие положительные тренды вниз по

течению. Наиболее тесные связи Th и U имеют с РЗЭ, но между собой в не коррелируют.

Спектры РЗЭ, нормализованные по североамериканскому сланцу (NASC), и соотношение сумм концентраций $\text{CPЗЭ} > \text{TPЗЭ} > \text{LPЗЭ}$ в водах р. Мзымты летом выдержаны на всем ее протяжении с положительным трендом к устью. Весной степень фракционирования РЗЭ заметно меньше и их состав беднее.

В летний период в воде р. Мзымты установлены превышения ПДК по Fe, Al, Mn, Cu, V, Zn, Pb, Ni, As, Cd и Be. Весной — только по Cd и Zn. Суммарное загрязнение воды в летний период по величине лимитирующего признака вредности компонентов Кр на большем протяжении реки соответствует особо опасной степени и относительно фона по суммарному показателю загрязнения Zc — очень высокому уровню. Весной качество воды по показателю Кр незначительно превышает нижний порог опасной степени загрязнения и по показателю Zc имеет слабый уровень загрязнения. Содержание в воде р. Мзымты U ниже ПДК более, чем на 2 порядка.

Геохимическую специализацию донных отложений в верховьях р. Мзымты, образующихся за счет гранитов и габбро-диоритов, определяют 16 элемента, в остальной части бассейна, сложенной преимущественно осадочными породами, — 27 элементов. Донные отложения обогащены РЗЭ. Содержания элементов в них, включая РЗЭ, Th и U, в отличие от воды реки, не обнаруживают явных трендов.

Уровень суммарного загрязнения донных отложений р. Мзымты относительно местного геохимического фона по показателю Zc в основном слабый, редко — средний, при значениях Kc элементов, не превышающих 1.5. В целом для донных отложений, как и для вод, Th и U являются дефицитными, но, в отличие от воды, в них установлены повышенные значения Th/U (до 7.4).

Донные отложения р. Мзымты отличаются невысокими значениями удельной активности естественных радионуклидов ^{226}Ra , ^{228}Ra , ^{224}Ra , ^{232}Th и ^{40}K , незначительно превышающими фон для горных пород Краснодарского края только в одной точке в среднем течении. Значащее содержание техногенного радионуклида ^{137}Cs , равное 23 ± 4 Бк/кг, обнаружено в одной точке в верховье реки. Радиоэкологическое состояние вод и донных отложений р. Мзымты в целом можно признать вполне благополучным.

Результаты факторного анализа показывают, что геохимический состав вод р. Мзымты, в сравнении с составом донных отложений, в значительно меньшей степени зависит от различия горных пород, слагающих конкретные участки бассейна денудации.

Выделено три основных типа источников поступления химических элементов в воду р. Мзымты: природные, природно-техногенные и антропогенно-техногенные. Первый тип, вносящий наибольший вклад в состав вод реки, представлен породами геологического основания долины. Второй тип – это техногенные объекты, сложенные измельченными местными породами (насыпи, отвалы, осыпи и т.д.), на совмещенных автомобильной и железной трассах “Адлер–Роза Хутор”, на курорте Красная Поляна и в окрестностях Роза Хутор, появившиеся при подготовке Зимних Олимпийских игр 2014 г. в г. Сочи и в более позднее время. Третий тип источников связан с продуктами и отходами жизнедеятельности и производственной деятельности человека.

По набору элементов первые два типа источников практически не отличаются и определяют 80.8% общей дисперсии геохимического состава вод р. Мзымты. Антропогенно-техногенные факторы не всегда очевидны и вносят ограниченный вклад в дисперсию состава вод и донных отложений реки.

Публикация подготовлена в рамках выполнения Государственного задания ФИЦ СЦ РАН № 0492-2021-0016 и осуществляется при финансовой поддержке Кубанского научного фонда в рамках научного проекта № МФИ-20.1/6 и Гранта РФФИ и Краснодарского края № 19-45-230020 p_a.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Асварова Т.А. (2006) Экологические закономерности распределения и миграции урана и тория в почвенно-растительном покрове Большого Кавказа. Автореф. дис. ... кандидата биол. наук. Махачкала. Дагестанский госуниверситет, 24 с.
- Богуш И.А., Черкашин В.И. (2012) Металлогения юрских осадочных комплексов Кавказа. *Сборник статей по материалам научно-практической конференции, посвященной памяти заслуженного геолога РФ Д.А. Мирзоева. Труды Института геологии ДНЦ РАН. Вып. 58. Региональная геология и нефтегазоносность Кавказа*. Махачкала, 7–13.
- Борисов В.И. (2005) Реки Кубани. Краснодар: Кубан. кн. изд-во, 120 с.
- Виноградов А.П. (1967) *Введение в геохимию океана*. М.: Наука, 216 с.
- Воробьев С.А. (2000) *Программный пакет комплексной обработки геолого-геохимических данных Gold Digger. Документация и описание*. М.: МПР, 50 с.
- Газеев В.М., Гурбанов А.Г., Кондрашов И.А. (2018) Палеогеновая базальт–трахитовая формация Западного Кавказа: геохимическая специфика, вопросы петрогенезиса, геодинамическая типизация, металлогения. *Геология и геофизика Юга России*. (4), 18–32.
- Гордеев В.В. (1983) *Речной сток в океан и черты его геохимии*. М.: Наука, 152 с.
- Гордеев В.В., Лисицын А.П. (1978) Средний химический состав взвесей рек мира и питание океанов речным осадочным материалом. *ДАН СССР*. **238**(1), 225–228.
- Гордеев В.В., Маккавеев Е.П., Коченкова А.И. (2015) Тяжелые металлы в воде и взвеси в устьях рек и прибрежной зоне российской части Кавказского побережья Черного моря. *Вода: химия и экология*. (11), 7–21.
- Гудкова Н. К., Оноприенко Н. Г. (2007) Создание туристско-спортивного горно-климатического комплекса “Красная Поляна”. *Экология и промышленность России* (январь), 30–34.
- Гуляева Н.Г. (2002) *Методические рекомендации, по эколого-геохимической оценке, территорий при проведении многоцелевого геохимического картирования масштабов 1 : 1000000 и 1 : 200000*. М.: ИМГРЭ, 70 с.
- Дрожжина К.В. (2013) Особенности природно-климатических условий бассейна реки Мзымта для целей рекреационной деятельности. *Молодой ученый*. (5), 196–198.
- Карандашев В.К., Лейкин А.Ю., Хвостиков В.А. и др. (2015) Анализ вод методом масс-спектрометрии с индуктивно-связанной плазмой. *Заводская лаборатория. Диагностика материалов*. **81**(5), 5–18.
- Карелина Е.В., Марков В.Е., Блоков В.И. (2017) Перспективность Краснополянского района города Сочи на благороднометалльное оруденение. *Вестник Российского университета дружбы народов. Серия: “Инженерные исследования”*. **18**(4), 497–504.
- Лаврищев В.А., Пруцкий Н.И., Семенов В.М. и др. (2002) Государственная геологическая карта Российской Федерации масштаба 1 : 200000. Серия Кавказская. Лист К-37-V. Изд. 2-е. СПб.
- Лурье П.М., Панов В.Д. (2012) Характеристика источников питания рек Черноморского побережья Кавказа. *Известия Краснодарского государственного университета. Естественные науки*. (1), 88–92.
- Никаноров А.М. (2001) *Гидрохимия*. СПб: Гидрометеиздат, 235.
- Нормативы качества воды водных объектов рыбохозяйственного значения, в том числе нормативы предельно допустимых концентраций вредных веществ в водах водных объектов рыбохозяйственного значения. Приказ Минсельхоза России от 13.12.2016 № 552.
- Об утверждении правил рыболовства для Азово-Черноморского рыбохозяйственного бассейна. Приказ Минсельхоза России от 01 августа 2013 г. № 293. 51 с.
- Организация и проведение режимных наблюдений за состоянием и загрязнением поверхностных вод суши. (2016) РД 52.24.309-2016. Ростов-на-Дону, 18–19.
- Основные санитарные правила обеспечения радиационной безопасности (ОСПОРБ-99/2010) (2010) Санитарные правила и нормативы. М.: Федеральный центр гигиены и эпидемиологии Роспотребнадзора, 68.
- Отчет о проведении работ по обследованию уровней загрязнения окружающей среды (воздух, вода, донные отложения, почва) в зоне строительства олимпийских объектов в г. Сочи 14–21 мая 2010 г. (2010) Федеральная служба по гидрометеорологии и мониторингу окружающей среды. Обнинск, 111 с. URL: http://www.feerc.obninsk.org/monit_data
- Панюшкина Г.И., Нагалецкий В.Я. (2007) Распределение и миграция радионуклидов в почвенно-расти-

тельном покрове Краснодарского края. *Вестник Южного научного центра РАН*. 3(2), 52-56.

Перельман А.И. (1975) *Геохимия ландшафта*. М.: Высш. школа, 342 с.

Предельно допустимые концентрации (ПДК) химических веществ в воде водных объектов хозяйственно-питьевого и культурно-бытового водопользования. (2003) Гигиенические нормативы ГН 2.2.5.1315-03. М.: Российский регистр потенциально опасных химических и биологических веществ Министерства здравоохранения Российской Федерации, 154 с.

Предельно допустимые концентрации (ПДК) химических веществ в воде водных объектов хозяйственно-питьевого и культурно-бытового водопользования. (2007) Дополнения и изменения N 1 к ГН 2.1.5.1315-03. Гигиенические нормативы. ГН 2.1.5.2280-07. Бюллетень нормативных актов федеральных органов исполнительной власти (50).

Рихванов Л.П. (2004) Радиоактивные элементы в геосферных оболочках. Радиоактивность и радиоактивные элементы в среде обитания человека. *Материалы II Международной конференции, Томск, 18–22 октября 2004 г.* Томск, Тандем-Арт, 498-506.

Саэт Ю.Е., Ревич Б.А., Янин Е.П. и др. (1990) *Геохимия окружающей среды*. М.: Недра, 335 с.

Скляр Е.В., Гладкочуб Д.П., Донская Т.В. и др. (2001) Интерпретация геохимических данных. М.: Изд-во "Интермет Инжиниринг", 288 с.

Соловов А.П. (1985) *Геохимические методы поисков месторождений полезных ископаемых*. М.: Недра, 70.

Справка о выполнении предварительного радиационного обследования участка дороги Красная Поляна-Альпика-Сервис-Роза Хутор. (2009). http://www.feerc.ru/monit_data/ro_kr_polyana.php

Титаева Н.А. (2005) *Геохимия природных радиоактивных рядов распада*. М.: ГЕОС, 328 с.

Шварцев С.Л. (1998) *Гидрогеохимия зоны гипергенеза*. М.: Недра, 366 с.

Aubert D., Stille P., Probst A., Gauthier-Lafaye F., Pouchot L., Del Nero M. (2002) Characterization and migration of atmospheric REE in soils and surface waters. *Geochim. Cosmochim. Acta*. 66(19), 3339-3350.

Grigoriev N.A. (2003). Average concentrations of chemical elements in rocks of the upper continental crust. *Geochemistry International*. 41(7), 711-718.

Haskin L.A., Haskin M.A., Frey F.A., Wildman T.R. (1968) Relative and absolute terrestrial abundance's of the rare earths. In *Origin and Distribution of the Elements* (Eds. Ahrens L.H.). Pergamon Press, 889-912.