

ИЗМЕНЕНИЕ ЭКОЛОГО-ГЕОХИМИЧЕСКОГО СОСТОЯНИЯ ДОННЫХ ОТЛОЖЕНИЙ В РАЙОНЕ МЕДНО-КОЛЧЕДАНЫХ МЕСТОРОЖДЕНИЙ (НА ПРИМЕРЕ КАРАБАШСКИХ МЕСТОРОЖДЕНИЙ МЕДИ)

М.В. Шабанов¹, М.С. Маричев¹, Т.М. Минкина², В.Д. Раджпут², Т.В. Бауэр²

¹ Санкт-Петербургский государственный аграрный университет,
Санкт-Петербург, Пушкин, Россия, e-mail: m.s.marichev@yandex.ru

² Южный Федеральный Университет, Ростов-на-Дону, Россия

Аннотация: Развитие горного дела на территории Соймоновской долины берет свое начало в первой половине XIX в. С развитием технологий и потребностей промышленности на территории долины велись горные работы по добыче медно-колчеданных руд. В дальнейшем в начале XX в. был возведен медеплавильный завод. В результате до настоящего времени на данной территории складировалось огромное количество отходов добычи и переработки медной руды. За счет обильных техногенных потоков с отвальных масс и газопылевых выбросов горнопромышленного комплекса образовались аномальные зоны с высоким содержанием тяжелых металлов в депонирующих средах. Одни из основных депонирующих сред – донные отложения, которые являются как аккумулялирующим агентом, так и источником поллютантов. В связи с высокими рисками ухудшения здоровья населения за счет прямого или косвенного взаимодействия со средами, аккумулялирующими в себе поллютанты, необходим постоянный контроль за изменением их эколого-геохимического состояния. В ходе работ было исследовано 12 участков, расположенных на различных направлениях и расстояниях от источников загрязнения, отобраны пробы донных отложений. В отобранных образцах методом рентгеновской дифракции определен минералогический состав. Количественное содержание металлов определялось рентгеноспектральным методом. По результатам полученных данных проведены расчеты геохимических коэффициентов, дающих оценку степени загрязненности и накопления поллютантов. Построена корреляционная зависимость между металлами в донных отложениях. Согласно расчетам суммарного коэффициента загрязнения (Z_c) выявлены локальные зоны с высоким и очень высоким уровнем загрязнения. По значениям коэффициента обогащения (EF) установлено две группы минералов: устойчивые к выветриванию и техногенного происхождения. Выявлено, что донные отложения состоят преимущественно из псаммитовой фракции. В них преобладают первичные минералы, кварц, альбит. Присутствует аутигенный минерал пирит, в донных осадках преобладают халькофильные и литофильные элементы, которые и являются основными загрязнителями. Результаты данной работы могут способствовать решению проблем экологической безопасности региона, пересмотру технологий хранения и переработки медно-колчеданных руд с целью улучшения экологической обстановки и улучшения здоровья населения.

Ключевые слова: Соймоновская долина, Карабаш, тяжелые металлы, халькофильные элементы, эколого-геохимическое состояние донных отложений.

Благодарность: Работа выполнена при финансовой поддержке Российского научного фонда (проект № 21-77-20089) в Южном федеральном университете.

Для цитирования: Шабанов М. В., Маричев М. С., Минкина Т. М., Раджпут В. Д., Бауэр Т. В. Изменение эколого-геохимического состояния донных отложений в районе медно-колчеданных месторождений (на примере Карабашских месторождений меди) // Горный информационно-аналитический бюллетень. – 2023. – № 5-1. – С. 117–134. DOI: 10.25018/0236_1493_2023_51_0_117.

Change in eco-geochemistry of bottom sediments in copper-pyrite mining area: A case-study of Karabash copper deposits

M.V. Shabanov¹, M.S. Marichev¹, T.M. Minkina², V.D. Rajput², T.V. Bauer²

¹ Saint-Petersburg State Agrarian University,
Saint-Petersburg, Pushkin, Russia, e-mail: m.s.marichev@yandex.ru

² Southern Federal University, Rostov-on-Don, Russia

Abstract: Development of the mining art in the Soimonov valley commenced in the first half of the 19th century. The technological advance and the growing needs of the industry promoted copper-pyrite mining in the area. Early in the 20th century, a copper smeltery was built in the valley. As a result, the huge amount of copper mining and processing waste have accumulated here by now. The plentiful induced flows from the waste dumps and the gas and dust emission from the mines gave birth to the anomalous zones of high concentrations of heavy metals in depositing media. Such depositing medium as bottom sediments is simultaneously a collector and a source of pollutants. Because of high health risk of direct or indirect interaction with the media-accumulators of pollutants, the eco-geochemistry of such media requires continuous control. During this research, 12 test sites differently located and spaced relative to pollution sources were explored, and bottom sediments were sampled. The samples were subjected to the X-ray diffraction analysis to determine their mineralogical compositions. The quantities of metals were determined from the X-ray spectroscopy. The obtained data were used to calculate geochemical rates of contamination and pollutant accumulation. The correlation dependence between metals contained in the bottom sediments was constructed. The calculated total contamination rate (Zc) allowed identifying local zones of high and extremely high levels of contamination. The enrichment factor (EF) helped distinguish between two groups of minerals: weathering-resistance and manmade. The bottom sediments mostly contain psammitic fractions. They are dominated by original minerals, quartz and albite. The authigenic mineral of pyrite is present, as well. The chalcophylic and lithophylic elements in the bottom sediments are the main pollutants. These studies can be beneficial in terms of the ecological safety of the region, and can foster revision of copper-pyrite mining and storage technologies toward a gain in health and improvement of ecological situation.

Key words: Soimonov valley, Karabash, heavy metals, chalcophylic elements, eco-geochemistry of bottom sediments.

Acknowledgements: The study was supported by the Russian Science Foundation, Project No 21-77-20089, in Southern Federal University.

For citation: Shabanov M. V., Marichev M. S., Minkina T. M., Rajput V. D., Bauer T. V. Change in eco-geochemistry of bottom sediments in copper-pyrite mining area: A case-study of Karabash copper deposits. *MIAB. Mining Inf. Anal. Bull.* 2023;(5-1):117-134. [In Russ]. DOI: 10.25018/0236_1493_2023_51_0_117.

Введение

Горнопромышленный комплекс Южного Урала занимает одно из ведущих мест в сырьевом балансе цветной металлургии Российской Федерации. При этом он является крупнейшим производителем отходов, среди которых ключевыми являются хвосты обогащения, шлаки, вскрышные породы.

Одним из основных промышленных центров является Челябинская область. Здесь расположены месторождения полиметаллических и медно-колчеданных руд, а также отработанные месторождения. Добыча и переработка колчеданных руд является одним из существенных источников загрязнения окружающей среды металлами и металлоидами [1–4]. Стремительное развитие горнопромышленного комплекса в последние годы становится серьезной экологической проблемой за счет увеличения эколого-геохимической нагрузки на ландшафты [5–8].

На территории Соймоновской долины расположено несколько отработанных месторождений, таких как Барнинское, Пионерское, Сталинское, Первомайское. Все они относятся к группе Карабашских медно-колчеданных месторождений. Первые разработки месторождения на данной местности начались еще в 1822 г., а уже в начале XX в. был возведен первый завод по переработке меди. За годы работы по добыче и переработке сырья было сформировано несколько хвостохранилищ и отвалов отработанной породы, которые и по настоящее время располагаются на территории Соймоновской долины. На протяжении длительного времени они образуют техногенные потоки, несущие в себе ряд элементов первого класса опасности, которые в дальнейшем накапливаются в депонирующих средах.

Вторым источником техногенных потоков поллютантов является горнопромышленный комплекс «Карабашмедь», расположенный на территории Соймо-

новской долины [9, 10]. В процессе транспортировки руды, складирования в результате пыления и переноса аэрогенными потоками взвешенные частицы оседают на прилегающих ландшафтах и в дальнейшем попадают в депонирующие среды [11, 12].

Динамика переноса техногенных потоков в речные системы зависит от деформации кристаллической структуры минерала и климатических факторов, что в свою очередь связано с процессами выветривания, эрозии, переноса и осаждения.

Среди прочих депонирующих сред донные отложения являются как аккумулярующим агентом, так и источником тяжелых металлов. При антропогенном вмешательстве поллютанты в них практически неподвижны, так как связаны с силикатами, оксидами, карбонатами, гидроксидами и сульфидами [13]. Многие исследователи [14–17] отмечают, что донные отложения поверхностных водотоков традиционно используются в качестве индикатора для выявления состава, интенсивности и масштаба техногенного загрязнения. В существенной мере это обусловлено тем, что русловые отложения, как важнейшие компоненты аквальных систем, являются конечным звеном местных ландшафтных сопряжений, в силу чего их состав отражает геохимические особенности водосборных территорий. Ряд исследователей отмечают, что особенно ярко подобная зависимость проявляется в бассейнах малых рек [18–21]. Они служат основными приемниками поверхностного стока с территорий, сточных вод, промышленных выпадений, отходов и агрохимикатов [22, 23]. Элементный состав донных отложений в основном зависит от литологических и литохимических особенностей пород, их трансформации, современных процессов гипергенного преобразования, является результатом сложного процесса

осадконакопления [24]. Так, на территории Соймоновской долины депонирующие среды уже на протяжении более 100 лет выступают приемником техногенных потоков, и донные отложения являются одними из основных приемников.

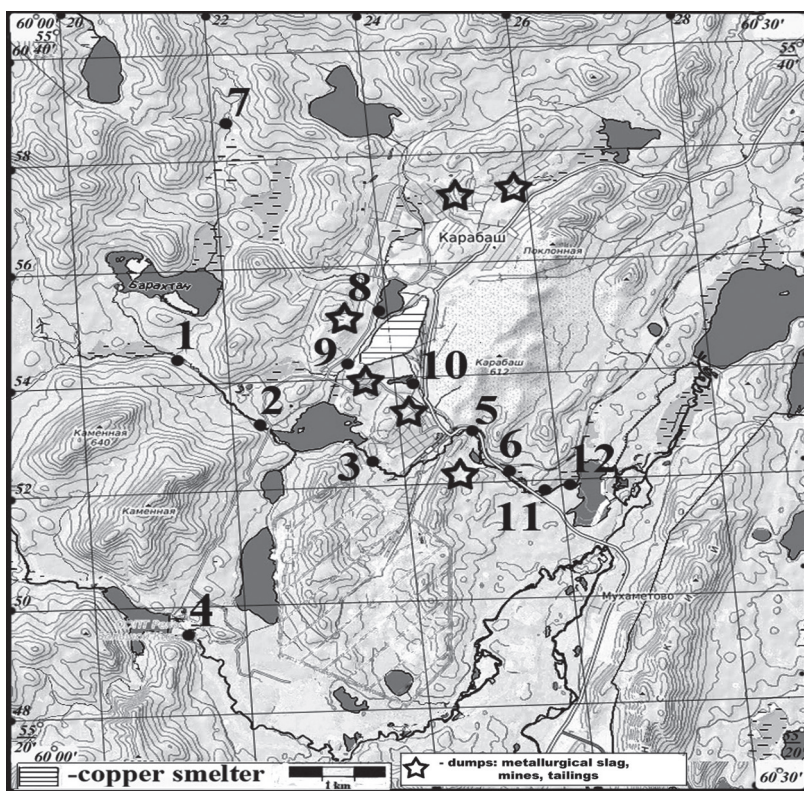
Из-за высокого влияния поллютантов на здоровье человека необходим контроль за процессами трансформации загрязнителей, образованием аномалий и ролью донных отложений в круговороте металлов. В связи с этим целью данной работы является исследование изменения эколого-геохимического состояния донных отложений в зоне медно-колчеданного месторождения.

Результаты данной работы будут способствовать решению ряда проблем уп-

равления экологической безопасностью региона. Полученные аналитические данные уровня загрязнения донных отложений водотоков Соймоновской долины могут способствовать пересмотру технологий складирования отходов после добычи и переработки медно-колчеданного сырья с учетом местности.

Материалы и методы

Объектами исследования являются донные отложения основных водотоков Соймоновской долины и прилегающих территорий. На различных расстояниях и направлениях от основных источников загрязнения (шлакоотвалы, вскрышные отвалы шахтных выработок, хвосты обогащения горнопромышленного предприятия) было отобрано 12 проб (рисунок)



Карта-схема расположения пунктов отбора проб донных отложений Карабашской геотехногенной системы

Layout of bottom sediment sampling sites of the Karabash geotechnogenic system

согласно ГОСТ 17.1.5.01-80. Исследовался верхний (до 10 см) слой донных отложений, представляющий собой смесь коренных четвертичных образований и современного наносного материала.

Условно в качестве фоновых объектов были выделены р. Каменка (7) и р. Большой Киалим (4). Водосборы этих рек сложены различными по составу и возрасту горными породами, что предопределяет различия в минералогическом составе донных отложений.

В геологическом строении водосборов р. Сак-Элга, точки отбора (т.о.) 1 и 2, и р. Каменка (т.о. 7), принимают участие ранне- PR_{1eq} и позднепротерозойские отложения RF_2kr_1 , представленные амфиболитовой фацией и эпидот-амфиболитовой фацией метаморфизма в верхнем течении. В нижнем течении (т.о. 5, 6, 11, 12) — среднедевонские образования, представленные андезитами, дацититами, туфопесчаниками и вулканомиктовые песчаники.

Водосбор р. Большой Киалим (т.о. 4), 7 км на юг от КМК, сложен позднеордовикскими отложениями σO_3tl_1 , представленный дунитами и серпентинизированными клинопироксенами.

В формировании центральной части долины, в районе медеплавильного комбината, (Городской пруд (т.о. 8), ручей Серебрянка (т.о. 9), «Технологический» пруд (т.о. 10) и среднее течение р. Сак-Элга (т.о. 3)) принимают участие апогабровые амфиболиты vO_3tl_2 [25].

Минералогический состав порошкообразных твердых образцов донных отложений определяли методом рентгеновской дифракции (дифрактометр Shimadzu XRD-7000) с использованием Cu-K α -излучения и кристаллического монохроматора. Рентгенограммы записывали при значениях 2θ от 2° до 80° со скоростью сканирования $2^\circ/\text{мин}$ (ASTMD 934-08).

Определение содержания металлов в пробах донных отложений прово-

дили рентгеноспектральным методом (ФР.1.31.2006.02634).

Для оценки степени загрязнения полученные значения сравнивались с кларковыми концентрациями верхней части континентальной земной коры [26] для кремния, рублидия и стронция по А.П. Виноградову [27].

Проводился расчет коэффициента концентрации (K_c) (СанПиН № 1.2.3685-21) как отношение фактической концентрации вещества в пробе донных отложений к фоновому значению.

При этом была введена следующая классификация: чем больше K_c превышает это значение, тем выше уровень аномальности содержания металла в донных отложениях исследуемого объекта. Значение K_c ниже 1,5 указывает на природную вариацию содержания вещества (отсутствие аномалии).

Определен суммарный показатель загрязнения Z_c (СанПиН № 1.2.3685-21), представляющий собой сумму коэффициентов концентрации (K_c) элементов, входящих в геохимическую ассоциацию, и отражающий аддитивное превышение фонового уровня группой ассоциирующихся элементов. При расчете Z_c , учитывались лишь значения $K_c > 2$:

$$Z_c = \sum_{j=1}^n K_c - (n-1), \quad (1)$$

где n — количество элементов, входящих в геохимическую ассоциацию.

Для оценки техногенного загрязнения водотоков по интенсивности накопления металлов в донных отложениях использована следующая градация: при значениях Z_c менее 10 — уровень загрязнения оценивается как «слабый», от 10 до 30 — «средний», от 30 до 100 — «высокий», от 100 до 300 — «очень высокий», и при Z_c более 300 — «чрезвычайно высокий» (СанПиН № 1.2.3685-21).

Для оценки степени накопления элемента в донных отложениях проводи-

лись расчеты коэффициента обогащения EF , который отражает уровень загрязнения и возможное техногенное воздействие [28–30]:

$$EF = \frac{\frac{C_M(\text{sample})}{C_X}}{\frac{C_M(\text{earth crust})}{C_X}}, \quad (2)$$

где C_M – содержание исследуемого металла; C_X – содержание неподвижного элемента.

В качестве неподвижного элемента могут быть: Al [31], Fe и Ti [32], Mn или Li, Sc, Zr [30]. Нами в качестве эталонного значения был выбран Al.

На основе коэффициента обогащения данные интерпретируются по пяти категориям [33], при значениях EF :

< 2 – от дефицита до минимального обогащения;

2–5 – умеренное обогащение;

5–20 – значительное обогащение;

20–40 – очень высокое обогащение;

> 40 – чрезвычайно высокое обогащение.

Для понимания происходящих процессов в донных отложениях исследуемой территории применены расчеты петрохимических модулей: гидролизатный модуль (GM), $GM = Al_2O_3 + Fe_2O_3/SiO_2$, позволяющий разделять продукты гидролиза и кремнезема; Rb/Sr – модуль, используемый в качестве индикатора химического выветривания. Чем выше значения данных модулей, тем более сильное и глубокое выветривание претерпевают породы источников сноса; чем меньше модуль, тем выше зрелость осадочных пород.

Результаты и обсуждение

Донные отложения изученных водотоков характеризуются полиминеральным составом и являются сложными в литолого-минералогическом отношении. Всего в составе донных отложений выяв-

лен 21 минеральный вид и продукты металлургического происхождения, представленные шлаком.

По гранулометрическому составу осадки представлены псаммитовой фракцией, в которой преобладают грубо- и среднезернистые пески. Данная фракция образует минеральные компоненты двух групп – теригенные и аутигенные. Первые составляют основу и представлены силикатами и алюмосиликатами, среди аутигенных – пирит, доломит и кальцит.

Минеральный состав исследуемых образцов складывается в основном кварцем – 13,0–71,7%, альбитом – 2,39–12,12%, мусковитом и клинохлором. Кварц-полевошпатовое отношение – от 1,52 до 22,7, это отношение отражает переменное доминирование кварца и полевого шпата и может указывать на наличие нескольких источников терригенного материала.

Минералы группы слюд представлены мусковитом и распространены повсеместно на всей исследуемой территории.

Своеобразным индикатором преобладания интрузивных пород в бассейне водосбора является наличие в составе отложений кристобалита. Одним из компонентов донных осадков является пирит (аутигенный минерал), он встречается в точках отбора 6, 11, 12. Повышенные концентрации пирита обусловлены близким расположением к району хвостохранилища.

В качестве оценки степени техногенного загрязнения водных объектов и интенсивности накопления тяжелых металлов в донных отложениях рассчитаны значения Zc (см. табл. 2) и составлены формулы геохимических ассоциаций:

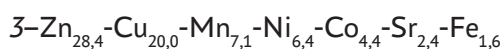


Таблица 1

Минералогический состав донных отложений, %
Mineralogical composition of bottom sediments, %

Название / Формула	Точки отбора											
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
Кварц / SiO ₂	50,90	65,20	66,4	64,00	38,40	68,30	15,80	53,00	13,90	71,70	58,8	64,7
Альбит / NaAlSi ₃ O ₈	10,00	20,00	8,17	2,82	4,14	14,70	2,39	12,20	9,16	5,65	9,28	8,16
Мусковит / KAlSi ₃ O ₁₀ (OH) ₂	10,00	3,79		7,45			7,56	1,71	6,01	16,60	6,84	7,53
Клинохлор / (Mg, Fe, Al) ₆ (Si, Al) ₄ O ₁₀ (OH) ₈	1,68	1,26	4,29	2,12	3,72	2,26	10,10	3,42	6,84	5,93	2,53	2,14
Гастингсит / (Ca, Na) ₂ (Fe, Mg) ₅ (Si, Al) ₈ O ₂₂ (OH) ₂	1,68			6,36			6,45		11,90		5,84	4,28
Антигорит / Mg ₃ Si ₂ O ₅ (OH) ₄	16,8	4,21	8,58	14,80	29,80		49,70		19,60		3,89	4,28
Доломит / CaMg(CO ₃) ₂	0,60	3,02		2,28		1,62					1,39	0,76
Кристобалит / SiO ₂	0,77						0,54		0,49		1,11	
Ортоклаз / K(AlSi ₃ O ₈)	7,29											
Анортоклаз / KAlSi ₃ O ₈		2,31										
Тальк / Mg ₃ Si ₄ O ₁₀ (OH) ₂			8,17		21,30	4,52						
Рибекит / Na ₂ Fe ₂ +3Fe ₃ +2[Si ₁₈ O ₂₂](OH) ₂			4,29		2,48							
Пирит / FeS ₂						1,94					9,37	7,51
Кордиерит / (Mg, Fe) ₂ [Al ₄ Si ₅ O ₁₈] · nH ₂ O						2,04						
Магнетит / Fe ₃ O ₄							2,15	2,10				
Шабазит / Ca _{1,95} Al _{3,9} Si _{8,1} O ₂₄							1,58				0,43	0,23
Гетит / Fe ₂ O ₃ · H ₂ O							3,58					
Кальцит / CaCO ₃								2,65	26,7			
Тремолит / Ca ₂ Mg ₃ [(OH, F)Si ₄ O ₁₁] ₂								8,56				
Микроклин / K(AlSi ₃ O ₈)								16,2				
Анкерит / Ca(Mg _{0,67} Fe _{0,33} ⁺²)(CO ₃) ₂									5,13			

Таблица 2

Содержание элементов в донных отложениях, %
Content of metals in bottom sediments, %

№ Э	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	Фон [19, 20]*
Fe	<u>2,43</u> 0,63	<u>2,34</u> 0,61	<u>6,19</u> 1,61	<u>10,58</u> 1,59	<u>9,13</u> 2,37	<u>6,1</u> 2,37	<u>9,11</u> 3,62	<u>13,94</u> 2,94	<u>11,32</u> 1,18	<u>4,53</u> 2,89	<u>11,12</u> 3,10	<u>11,91</u> 2,75	3,91
Co	<u>0,0015</u> 0,88	<u>0,0019</u> 1,12	<u>0,0051</u> 3,0	<u>0,0067</u> 2,29	<u>0,0077</u> 4,52	<u>0,0039</u> 3,29	<u>0,0056</u> 4,99	<u>0,0085</u> 5,64	<u>0,0096</u> 1,64	<u>0,0028</u> 3,99	<u>0,0068</u> 4,41	<u>0,0075</u> 3,94	0,0017
Ni	<u>0</u> —	<u>0,01</u> 2,16	<u>0,02</u> 4,32	<u>0,02</u> 2,16	<u>0,03</u> 6,49	<u>0,01</u> 4,32	<u>0,02</u> 6,49	<u>0,03</u> 10,81	<u>0,05</u> 2,16	<u>0,01</u> 6,49	<u>0,03</u> 6,49	<u>0,03</u> 4,32	0,0047
Cu	<u>0,0013</u> 0,47	<u>0,0032</u> 1,16	<u>0,014</u> 5,08	<u>0,079</u> 0,36	<u>0,056</u> 20,32	<u>0,001</u> 40,29	<u>0,111</u> 17,78	<u>0,049</u> 348,41	<u>0,96</u> 5,08	<u>0,014</u> 9,07	<u>0,025</u> 27,95	<u>0,077</u> 28,67	0,0028
Zn	<u>0,0054</u> 0,82	<u>0,017</u> 2,58	<u>0,14</u> 21,32	<u>0,076</u> 1,41	<u>0,19</u> 28,82	<u>0,0093</u> 13,04	<u>0,086</u> 3,34	<u>0,022</u> 145,61	<u>0,96</u> 14,56	<u>0,096</u> 3,34	<u>0,022</u> 10,47	<u>0,069</u> 11,53	0,0067
Rb	<u>0,0038</u> 0,26	<u>0,0047</u> 0,32	<u>0,0048</u> 0,33	<u>0,0012</u> 0,07	<u>0,0038</u> 0,26	<u>0,0011</u> 0,09	<u>0,0014</u> 0,05	<u>0,0008</u> 0,23	<u>0,0034</u> 0,04	<u>0,0006</u> 0,24	<u>0,0035</u> 0,09	<u>0,0013</u> 0,08	0,015*
Sr	<u>0,036</u> 1,14	<u>0,079</u> 2,51	<u>0,078</u> 2,48	<u>0,02</u> 0,41	<u>0,063</u> 2,00	<u>0,013</u> 0,73	<u>0,023</u> 0,23	<u>0,0073</u> 1,84	<u>0,058</u> 0,67	<u>0,021</u> 0,17	<u>0,0052</u> 0,64	<u>0,02</u> 0,64	0,032*
Zr	<u>0,0069</u> 0,41	<u>0,01</u> 0,60	<u>0,01</u> 0,60	<u>0,0069</u> 0,60	<u>0,010</u> 0,60	<u>0,01</u> 0,45	<u>0,0075</u> 0,13	<u>0,0022</u> 0,60	<u>0,01</u> 0,26	<u>0,0044</u> 0,38	<u>0,0063</u> 0,38	<u>0,0064</u> 0,41	0,017
Na	<u>4,72</u> 1,98	<u>0,12</u> 0,05	<u>0,12</u> 0,05	<u>4,68</u> 2,52	<u>0,14</u> 2,52	<u>6,0</u> 1,13	<u>2,69</u> 5,91	<u>14,08</u> 0,05	<u>0,13</u> 3,23	<u>7,7</u> 0,68	<u>1,62</u> 1,95	<u>4,64</u> 1,97	2,42
Al	<u>8,02</u> 0	<u>11,07</u> 0	<u>11,86</u> 0	<u>10,65</u> 0	<u>10,0</u> 0	<u>8,98</u> 0	<u>8,04</u> 0	<u>7,24</u> 0	<u>8,08</u> 0	<u>5,57</u> 0	<u>6,59</u> 0	<u>9,45</u> 0	8,15
Si	<u>21,86</u> 0,87	<u>31,9</u> 1,17	<u>32,94</u> 1,21	<u>29,21</u> 0,90	<u>26,51</u> 0,97	<u>24,63</u> 0,83	<u>22,61</u> 0,67	<u>18,23</u> 0,85	<u>23,28</u> 0,54	<u>14,78</u> 0,69	<u>18,89</u> 0,95	<u>25,96</u> 1,07	27,7*
K	<u>1,99</u> 0,15	<u>1,08</u> 0,47	<u>1,05</u> 0,46	<u>1,14</u> 0,15	<u>0,64</u> 0,28	<u>0,35</u> 0,50	<u>1,14</u> 0,14	<u>0,31</u> 0,68	<u>1,55</u> 0	<u>0</u> 0	<u>2,17</u> 0,45	<u>1,03</u> 0,50	2,324
Ba	<u>0,009</u> 0,15	<u>0,046</u> 0,74	<u>0,064</u> 1,04	<u>0,07</u> 0,74	<u>0,074</u> 1,20	<u>0,046</u> 0,91	<u>0,056</u> 0,23	<u>0,014</u> 3,07	<u>0,19</u> 0,19	<u>0,012</u> 1,29	<u>0,08</u> 1,46	<u>0,09</u> 1,13	0,063
Ti	<u>0,056</u> 0,15	<u>0,068</u> 0,18	<u>0,097</u> 0,26	<u>0,41</u> 0,77	<u>0,11</u> 0,29	<u>0,29</u> 0,87	<u>0,33</u> 0,29	<u>0,11</u> 0,69	<u>0,26</u> 0,25	<u>0,094</u> 1,24	<u>0,47</u> 1,24	<u>0,47</u> 1,09	0,384
V	<u>0,0012</u> 0,13	<u>0,0015</u> 0,16	<u>0,0021</u> 0,22	<u>0,013</u> 0,31	<u>0,0026</u> 0,27	<u>0,0081</u> 0,85	<u>0</u> 0	<u>0,0063</u> 0,66	<u>0,0063</u> 0,20	<u>0,0019</u> 0,84	<u>0,008</u> 1,89	<u>0,018</u> 1,36	0,0097
Cr	<u>0,068</u> 7,51	<u>0</u> 0	<u>0</u> 0	<u>0,065</u> 15,02	<u>0</u> 0	<u>0,136</u> 4,42	<u>0,04</u> 28,72	<u>0</u> 0	<u>0,094</u> 10,38	<u>0,031</u> 3,42	<u>0,064</u> 7,07	<u>0,136</u> 7,18	0,0092
Mn	<u>0,028</u> 0,37	<u>0,03</u> 0,39	<u>0,55</u> 7,22	<u>0</u> 0,88	<u>0,073</u> 0,96	<u>0,067</u> 0,14	<u>0,011</u> 0,16	<u>0,012</u> 2,63	<u>0,2</u> 0,55	<u>0,042</u> 0	<u>0</u> 0	<u>0</u> 0	0,0774
Zc	—	5,13	38,23	18,6	57,53	62,65	55,23	501,50	29,61	19,12	52,12	52,46	—

* Примечание. В числителе указан % содержания элемента в донных отложениях, в знаменателе — коэффициент обогащения EF. Э — элемент.

11 – Cu_{27,5}-Zn_{10,3}-Cr_{6,9}-Ni_{6,4}-Co_{4,3}-Fe_{3,0}

12 – Cu_{28,2}-Zn_{11,3}-Cr_{7,1}-Ni_{4,2}-Co_{3,8}-Fe_{2,7}

6 – Cu_{39,6}-Zn_{12,8}-Cr_{4,3}-Ni_{4,2}-Co_{3,2}-Fe_{2,3}

7 – Cr_{28,3}-Cu_{17,5}-Ni_{6,3}-Co_{4,9}-Fe_{3,5}-Zn_{3,3}

5 – Zn_{28,3}-Cu_{20,0}-Ni_{6,4}-Co_{4,4}-Fe_{2,3}-Sr_{2,0}

10 – Cu_{8,9}-Ni_{6,4}-[Co, Zn, Cr]_{3,5}-Fe_{2,8}

Геохимическое ранжирование металлов по значениям K_c характеризует качественный состав и структуру геохимических аномалий. Установлено, что уровень техногенного загрязнения большинства рек по интенсивности накопления металлов в донных отложениях в целом оценивается как высокий и чрезвычайно опасный.

По данным геохимического ранжирования установлено преобладание халькофильных элементов в р. Сак-Элга (т.о. 5, 6, 11, 12) ниже по течению после впадения Рыжего ручья и в Городском пруду (т.о. 8), в который поступают гидрогенные потоки с отвальных масс, расположенных на территории комбината.

В одном из фоновых водотоков – р. Большой Киалим, в 7 км на юг от КМК (т.о. 4), по содержанию изученных компонентов не выявлено каких-либо превышений. Коэффициент концентрации $K_c < 3$, за исключением хрома ($K_c > 6$). Суммарный показатель загрязнения слабый.

Основным исследуемым водотоком является р. Сак-Элга, в верхнем ее течении (т.о. 1, 2) донные отложения также характеризуются K_c меньше 3, суммарный индекс загрязнения (Z_c) – слабый (см. табл. 2).

В центральной части Соймоновской долины, где расположен комбинат, газопылевые выбросы поступают в атмосферу, оседают на близлежащие ландшафты и смываются в водотоки. Часть

тяжелых металлов мигрирует во взвешенном состоянии, часть сорбируется донными отложениями.

Аномально высокое содержание халькофильных сидерафильных и литофильных элементов ($K_c > 1,5$ относительно фона) наблюдается в донных отложениях рр. Сак-Элга (т.о. 3, 5, 6, 11 и 12), Каменка (т.о. 7), Серебрянка (т.о. 9); в Городском (т.о. 8) и «Технологическом» (т.о. 10) прудах.

Среднее содержание халькофильных элементов варьируется в широком диапазоне: медь – 0,96–0,044%, цинк – 0,96–0,017% (табл. 2). Данные металлы в районе металлургического комбината являются косвенными индикаторами поступления техногенного вещества с окружающих ландшафтов. В нашем случае повышенные концентрации фиксируются в центральной части Соймоновской долины, в «Технологическом» пруду (т.о. 10) и в р. Сак-Элга ниже по течению (т.о. 5, 11, 12). На данных территориях формируются дополнительные техногенные потоки за счет аэрогенного и гидрогенного переноса материала с прилегающего хвостохранилища.

Вследствие образования сорбционных барьеров на поверхности глинистых минералов наблюдается прямая корреляционная зависимость в увеличении концентраций Zn, Ba и Cu.

Содержание литофильных элементов в донных отложениях в большей степени зависит от месторасположения отбора проб и минералогического состава подстилающих пород. Так, среднее содержание никеля в исследуемой депонирующей среде составляет от 0,05 до 0,01%, максимальная его концентрация отмечается в Городском пруду (т.о. 8). Поступление никеля в донные отложения связано с экзогенными процессами вмещающих пород, содержащих никелевые минералы, такие как сейнянокит, нисбит [34].

Таблица 3

Корреляционные связи между концентрациями тяжелых металлов в донных отложениях**Correlations between concentrations of heavy metals in bottom sediments**

	Co	Ni	Cu	Zn	Rb	Sr	Zr	Na	Mg	Al	Si	K	Ba	Ti	V	Cr	Mn
Fe	0,94	0,81	0,34	0,27	-0,39	-0,44	-0,36	0,27	0,04	-0,17	-0,21	0,01	0,45	0,59	0,50	0,30	-0,15
Co		0,94	0,55	0,53	-0,17	-0,16	-0,11	0,04	0,02	-0,04	-0,07	0,03	0,66	0,45	0,41	0,08	0,05
Ni			0,72	0,71	0,02	0,04	0,04	-0,17	0,16	-0,06	-0,05	0,14	0,81	0,39	0,34	-0,12	0,14
Cu				0,98	0,11	0,23	0,27	-0,28	0,27	-0,11	-0,05	0,24	0,85	0,13	0,13	-0,26	0,19
Zn					0,20	0,35	0,35	-0,36	0,17	-0,05	0,00	0,18	0,85	0,03	0,06	-0,35	0,32
Rb						0,80	0,63	-0,75	0,18	0,48	0,53	0,55	0,25	-0,37	-0,32	-0,70	0,51
Sr							0,71	-0,69	0,04	0,66	0,69	0,09	0,28	-0,55	-0,33	-0,67	0,62
Zr								-0,83	0,31	0,65	0,71	0,21	0,48	-0,07	-0,05	-0,73	0,46
Na									-0,50	-0,49	-0,58	-0,51	-0,56	-0,09	-0,15	0,97	-0,39
Mg										0,21	0,33	0,57	0,50	0,63	0,60	-0,49	-0,18
Al											0,99	0,04	0,16	-0,09	0,12	-0,43	0,47
Si												0,13	0,23	-0,04	0,15	-0,52	0,47
K													0,37	0,32	0,27	-0,50	0,01
Ba														0,44	0,44	-0,52	0,25
Ti															0,87	-0,07	-0,32
V																-0,20	-0,26
Cr																	-0,35

Примечание. Жирным шрифтом выделены наиболее высокие коэффициенты корреляции.

Содержание железа варьируется в пределах от 6,19 до 13,94%. Согласно полученным данным (см. табл. 2), отчетливо можно выделить локальные зоны обогащения железом донных отложений — «Технологический» пруд (т.о. 10) и нижнее течение р. Сак-Элга (т.о. 11, 12). Полученные значения позволяют предположить, что его поступление связано с изменением окислительно-восстановительных условий, в результате чего в осадки поступает больше железа в процессе седиментогенеза.

Содержание кобальта варьирует в пределах от 0,0028 до 0,0096%, наиболее высокие концентрации зафиксированы в Городском пруду (т.о. 8), р. Каменка

(т.о. 7) и нижнем течении р. Сак-Элга (т.о. 11, 12). Данный элемент так же, как и железо, малоподвижен в окислительной среде, и при этом между ними весьма высокая корреляционная связь (табл. 3).

Распределение хрома отличается от других элементов, его содержание в донных отложениях составляет от 0,031 до 0,26%. Данный элемент концентрируется преимущественно в фоновых водотоках. Прямая корреляционная связь наблюдается только с натрием, что свидетельствует о сорбции хрома преимущественно натриевыми алюмосиликатами.

Стронций в донных осадках выявлен в т.о. 2, 3, 5 и 8, где значение K_c более 1,5,

Таблица 4

Расчетные значения петрохимических модулей
Calculated values of petrochemical moduli

модуль \ №	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
ГМ	0,48	0,42	0,55	0,61	0,72	0,76	1,16	0,83	0,68	0,94	0,82	0,73
Rb/Sr	0,11	0,06	0,06	0,08	0,06	0,06	0,11	0,06	0,03	0,67	0,07	0,06

его концентрация варьирует от 0,0073 до 0,079%. Прослеживается весьма высокая корреляционная связь с рубидием и цирконием, чуть меньшая с кремнием и алюминием. Вероятно, данный элемент входит в состав кристаллических решеток полевых шпатов совместно с рубидием, цирконием и стронцием, что говорит о природной составляющей их наличия в донных отложениях.

Высокие концентрации марганца в т.о. 3 регламентируются рядом факторов. В первом случае — за счет раннедиагенетических процессов. Во втором случае — в результате поступления водных потоков из болот, расположенных в верхнем течении р. Сак-Элга.

Выявлен статистически значимый положительный уровень тесноты связей между изученными микроэлементами в донных отложениях водотоков.

В ходе проведенных расчетов петрохимических модулей (табл. 4) выявлено, что в фоновой зоне проходят преимущественно слабые процессы выветривания, условия ГМ от 0,42 до 0,61. В зоне высокой техногенной нагрузки модуль возрастает от 0,72 до 1,16, что свидетельствует об увеличении выветривания.

Предельные значения Rb/Sr — отношения от 0,03 до 0,11 — свидетельствуют о слабых процессах химического выветривания, и только в т.о. 10 это отношение равно 0,67, что позволяет предположить сильное химическое выветривание [35].

Часть исследователей [36] предполагают, что при значениях коэффициента обогащения в интервале $0,5 \leq EF \leq 1,5$

микроэлементы могут быть полностью получены из материалов земной коры или естественных процессов выветривания. При показателях $EF > 1,5$ предполагают о поступлении значительной части микроэлементов из некорковых материалов.

Согласно полученным значениям EF для Rb (0,05–0,33), Na (0,05–2,52), Mg (0,10–1,25), K (0,14–0,95), Ti (0,15–1,24), следует, что данные элементы в донных отложениях присутствуют за счет прохождения естественных процессов. Коэффициент накопления EF для Sr (0,17–2,51), Ca (0,05–6,48), Ba (0,15–3,07), V (0,13–1,89), Mn (0,14–7,22), Fe (0,63–3,62) превышает 1,5, что указывает на дополнительное поступление за счет техногенной составляющей.

Для ряда металлов: Cu (0,36–348,41), Zn (0,82–145,61), Ni (2,16–10,81), Cr (3,42–28,72), высокие значения коэффициента EF свидетельствуют о прямом поступлении элементов в донные отложения в результате техногенного массопереноса. Самые низкие значения $<1,5$ характерны для фоновых водотоков (см. табл. 2).

В донных отложениях минералогический состав напрямую связан с гранулометрическим составом. Так, в псаммитовой фракции содержание минералов, устойчивых к механическому разрушению, увеличивается. В основном это минералы с большим удельным весом — амфиболы и кварц, в меньшей степени — полевые шпаты. Практически отсутствуют рудные минералы — магнетит и пирит. В составе донных

отложений исследуемых водотоков отчетливо можно выделить две группы компонентов — природные и техногенные. Природный материал поступает преимущественно из кор выветривания, ранне- и позднепротерозойских отложений. Техногенные компоненты представлены преимущественно осадком в виде зерен металлургического шлака и пирита, который поступает с обильными аэрогенными и гидрогенными потоками с хвостохранилищ.

Заключение

Согласно распределению изученных элементов, в донных отложениях исследуемой территории можно выделить 4 группы: литофильные — входящие в состав силикатов и алюмосиликатов, Rb, Sr, Al, Si, Mg, K; халькофильные — Cu, Zn; сидерофильные — Ni, Fe, и литофильные — имеющие рудное происхождение, Cr. В составе минералов донных отложений фиксируются устойчивые к выветриванию — альбит, кварц, ортоклаз, и техногенные минералы — пирит.

Халькофильные и сидерофильные элементы оказывают прямое влияние на изменение эколого-геохимического состава донных отложений. Так, согласно полученным значениям суммарного коэффициента Zc, в нижнем течении р. Сак-Элга (т.о. 5, 6, 11, 12), а также вблизи комбината (т.о. 8, 10) уровень загрязнения — высокий.

Расчеты коэффициента накопления EF свидетельствуют, что медь, цинк и железо имеют преимущественно техногенное происхождение в донных от-

ложениях, хром и никель — природное, за счет выщелачивания из минералов. Зафиксированы участки с повышенным содержанием рубидия и стронция, которые образованы в результате соединений с кристаллической структурой алюмосиликатов. Расчеты петрохимических модулей указывают на явное усиление процессов химического выветривания вблизи горнопромышленного предприятия, в нижнем течении р. Сак-Элга. В донных отложениях фоновых участков — слабое химическое выветривание.

Полученные аналитические данные по уровню загрязнения донных отложений свидетельствуют о прямом влиянии складированных на территории Соймоновской долины отходов добычи и переработки медно-колчеданного сырья. Загрязнение преимущественно формируется за счет поступления с техногенными потоками халькофильных и сидерофильных элементов.

В связи с высокой опасностью вовлечения загрязнения в гидрологическую сеть Соймоновской долины необходимо пересмотреть место и способы хранения и размещения отходов после добычи и переработки медно-колчеданных руд, а также максимально исключить пыление доставляемой породы на горнопромышленный комплекс. А внесение изменений в технологический цикл, с более детальным извлечением халькофильных и сидерофильных элементов из перерабатываемых пород, будет способствовать уменьшению степени техногенного влияния горнопромышленной отрасли на эколого-геохимическое состояние региона.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Болтыров В. Б., Стороженко Л. А., Сапсай М. А. Накопленный экологический вред территорий размещения горнопромышленных отходов прошлых лет // Горный информа-

ционно-аналитический бюллетень. — 2021. — № 5-2. — С. 202–217. DOI: 10.25018/0236_1493_2021_52_0_202.

2. Sokolov A. A., Samonova K. V., Umarkhadzhiev M.-K. R. Methodological support for increasing the technological potential in industry according to technological potential level and cyclical development // *Journal of Physics: Conference Series*. 2022, vol. 2176, no. 1, article 012095. DOI: 10.1088/1742-6596/2176/1/012095.

3. Усманов А. И., Горбунов А. В. Изменение свойств техногенных грунтов в процессе рекультивации с использованием торфо-диатомитового мелиоранта // Горный информационно-аналитический бюллетень. — 2021. — № 5-2. — С. 283–294. DOI: 10.25018/0236_1493_2021_52_0_283.

4. Шабанов М. В., Маричев М. С. Оценка трансформации природно-территориальных комплексов при горнопромышленном техногенезе // *Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов*. — 2020. — Т. 331. — № 3. — С. 90–99. DOI: 10.18799/24131830/2020/3/2535.

5. Sokolov A. A., Fomenko O. A., Ignatev I. V. Development of algorithms for control and control of electric power parameters based on information-measuring system data // *Journal of Physics: Conference Series*. 2022, vol. 2176, no. 1, article 012076. DOI: 10.1088/1742-6596/2176/1/012076.

6. Почечун В. А., Макаров Я. А. Натурное обследование хвостохранилища Качканарского промузла Среднего Урала и оценка его воздействия на почву // Горный информационно-аналитический бюллетень. — 2022. — № 11-1. — С. 68–79. DOI: 10.25018/0236_1493_2022_111_0_68.

7. Елохин В. А. Геохимическая трансформация почв в зоне влияния шлакового отвала за период 2006–2020 гг. // Горный информационно-аналитический бюллетень. — 2021. — № 11-1. — С. 98–110. DOI: 10.25018/0236_1493_2021_111_0_98.

8. Шестопалов В. Л., Фоменко В. А., Соколов А. А., Мирошников А. С. Сравнительный анализ деформационных методов мониторинга сейсмической активности горных районов Черноморского побережья и Камчатки // Устойчивое развитие горных территорий. — 2021. — Т. 13. — № 4. — С. 535–543. DOI: 10.21177/1998-4502-2021-13-4-535-543.

9. Gashkina N. A., Tatsii Y. G., Udachin V. N., Aminov P. G. Biogeochemical indication of environmental contamination: a case study of a large copper smelter // *Geochemistry International*. 2015, vol. 53, no. 3, pp. 253–264. DOI: 10.1134/S0016702915030076.

10. Hechler J., Udachin V., Aminov P., Beckett P. J., Spiers G. A. Efflorescent sulfate minerals of the Karabash mining/smelting area, Ural mountains, Russia // *Mineralogy*. 2018, vol. 4, no. 4, pp. 96–101.

11. Майорова Л. П., Черенцова А. А., Крупская Л. Т., Голубев Д. А., Колобанов К. А. Оценка техногенного загрязнения воздушного бассейна при пылении хвостохранилищ // Горный информационно-аналитический бюллетень. — 2021. — № 1. — С. 5–20. DOI: 10.25018/0236-1493-2021-1-0-5-20.

12. Скопинцева О. В., Ганова С. Д., Бузин А. А., Федотова В. П. Мероприятия по борьбе с пылью при погрузке и транспортировании твердых полезных ископаемых // Горный журнал. — 2019. — № 12. — С. 76–79. DOI: 10.17580/gzh.2019.12.16.

13. Williamson B. J., Purvis O. W., Mikhailova I., Udachin V. SEM-EDX analysis in the source apportionment of particulate matter on Hypogymnia physodes lichen transplants around the Cu smelter and former mining town of Karabash, South Urals, Russia // *Science of the Total Environment*. 2004, vol. 322, no. 1-3, pp. 139–154. DOI: 10.1016/j.scitotenv.2003.09.021.

14. Narayan A., Mora A., Sánchez L., Rosales J. Temporal and spatial variability of heavy metals in bottom sediments and the aquatic macrophyte *Paspalum repens* of the Orinoco River floodplain lagoons impacted by industrial activities // *Environmental Science and Pollution Research*. 2020, vol. 27, pp. 37074–37086. DOI: 10.1007/s11356-020-09623-1.

15. Ren R. H., Tao L., Ren J. Spatial distribution and ecotoxicological assessment of heavy metals in bottom sediments of Yellow River from Inner Mongolia, China // *Geochemistry International*. 2021, vol. 59, no. 13, pp. 1354–1362. DOI: 10.1134/S0016702921100074.

16. Sojka M., Kaluza T., Siepak M., Strzelinski P. Heavy metals concentration in the bottom sediments of the mid-forest reservoirs // *Sylwan*. 2019, vol. 163, pp. 694–704. DOI: 10.26202/sylwan.2019038.

17. Kalekar P., Kamble P., Chakraborti S. Heavy metal contamination in surface sediments of the Upper Bhima Basin, Maharashtra, India // *Environmental Sustainability*. 2022, vol. 5, pp. 507–531. DOI: 10.1007/s42398-022-00252-7.

18. Шабанов М. В. Геохимия донных отложений рек Красноуральского промузла // *Известия Уральского государственного горного университета*. — 2019. — № 3(55). — С. 72–78. DOI: 10.21440/2307-2091-2019-3-72-78.

19. Плохов А. С., Харько П. А., Пашкевич М. А. Исследование влияния хвостового хозяйства медно-колчеданного месторождения на поверхностные воды // *Горный информационно-аналитический бюллетень*. — 2021. — № 4. — С. 57–68. DOI: 10.25018/0236_1493_2021_4_0_57.

20. Slukovskii Z. I. Geoecological assessment of small rivers in the big industrial city based on the data on heavy metal content in bottom sediments // *Meteorology and Hydrology*. 2015, vol. 40, no. 6, pp. 420–426. DOI: 10.3103/S1068373915060084.

21. Muravyeva E. V., Maslennikova N. N., Gibadulina I. I. Features accumulation of heavy metals in the bottom sediments of small rivers // *IOP Conference Series Earth and Environmental Science*. 2022, vol. 988, no. 3, article 032073. DOI: 10.1088/1755-1315/988/3/032073.

22. Passos E. A., Alves J. C., Santos I. S., Alves J. P. H., Garcia C. A., Costa A. C. Assessment of trace metals contamination in estuarine sediments using a sequential extraction technique and principal component analysis // *Microchemical Journal*. 2010, vol. 96, no. 1, pp. 50–57. DOI: 10.1016/j.microc.2010.01.018.

23. Linnik V. G., Bauer T. V., Minkina T. M., Mandzheva S. S., Mazarji M. Spatial distribution of heavy metals in soils of the flood plain of the Seversky Donets River (Russia) based on geostatistical methods // *Environmental Geochemistry and Health*. 2022, vol. 44, no. 2, pp. 319–333. DOI: 10.1007/s10653-020-00688-y.

24. Слукровский З. И., Гузева А. В., Даувальтер В. А., Удачин В. Н., Денисов Д. Б. Урановые аномалии в современных донных отложениях озер северной части Мурманской области, Арктика // *Геохимия*. — 2020. — Т. 65. — № 12. — С. 1231–1236. DOI: 10.31857/S0016752520100131.

25. Савельев Д. Е., Сначев В. И., Савельева Е. Н., Бажин Е. А. Геология, петрогеохимия и хромитовосность габбро-гипербазитовых массивов Южного Урала. — Уфа: ДизайнПолиграфСервис, 2008. — 320 с.

26. Rudnic R. L., Gao S. Composition of the continental crust / *Treatise on Geochemistry*. Elsevier, Amsterdam, 2003, 64 p. DOI: 10.1016/B0-08-043751-6/03016-4.

27. Виноградов А. П. Геохимия редких и рассеянных элементов в почвах. — М.: Изд-во АН СССР, 1957. — 237 с.

28. Янин Е. П. Техногенные геохимические ассоциации в донных отложениях малых рек (состав, особенности, методы оценки). — М.: ИМГРЭ, 2002. — 52 с.

29. Buat-Menard P., Chesselet R. Variable influence of the atmospheric flux on the trace metal chemistry of oceanic suspended matter Earth Planet // *Earth and Planetary Science Letters*. 1979, vol. 42, no. 3, pp. 398–411.

30. Liu W. H., Zhao J. Z., Ouyang Z. Y., Söderlund L., Liu G. H. Impacts of sewage irrigation on heavy metal distribution and contamination in Beijing, China // *Environment International*. 2005, vol. 31, no. 6, pp. 805–812. DOI: 10.1016/j.envint.2005.05.042.

31. Chatterjee M., Silva F. E. V., Sarkar S. K. Distribution and possible source of trace elements in the sediment cores of a tropical macrotidal estuary and their ecotoxicological sig-

nificance // *Environment International*. 2007, vol. 33, no. 3, pp. 346–356. DOI: 10.1016/j.envint.2006.11.013.

32. Zhang L., Ye X., Feng H. Jing Y., Ouyang T., Yu X., Liang R., Gao C., Chen W. Heavy metal contamination in Western Xiamen Bay sediments and its vicinity // *Marine Pollution Bulletin*. 2007, vol. 54, no. 7, pp. 974–982. DOI: 10.1016/j.marpolbul.2007.02.010.

33. Sutherland R. Bed sediment associated trace metals in an urban stream, Oahu, Hawaii // *Environmental Earth Sciences*. 2000, vol. 39, no. 6, pp. 611–627. DOI: 10.1007/s002540050473.

34. Белогуб Е. В., Удачин В. Н., Кораблев В. В. Карабашский рудный район (Южный Урал). – Миасс: ИМин УрО РАН, 2003. – 40 с.

35. Chen J., An Z. S., Head J. Variation of Rb/Sr ratios in the loess-paleosol sequences of Central China during the last 130,000 years and their implications for monsoon paleoclimatology // *Quaternary Research*. 1999, vol. 51, no. 3, pp. 215–219. DOI: 10.1006/qres.1999.2038.

36. Zhang J., Liu C. L. Riverine composition and estuarine geochemistry of particulate metals in China – weathering features, anthropogenic impact and chemical fluxes // *Estuarine Coastal and Shelf Science*. 2002, vol. 54, no. 6, pp. 1051–1070. DOI: 10.1006/ecss.2001.0879. **МИАБ**

REFERENCES

1. Boltzyrov V. B., Storozhenko L. A., Sapsay M. A. Cumulative ecological impact in the territory of long-term disposal of old mining waste. *MIAB. Mining Inf. Anal. Bull.* 2021, no. 5-2, pp. 202–217. [In Russ]. DOI: 10.25018/0236_1493_2021_52_0_202.

2. Sokolov A. A., Samonova K. V., Umardzhiev M.-K. R. Methodological support for increasing the technological potential in industry according to technological potential level and cyclical development. *Journal of Physics: Conference Series*. 2022, vol. 2176, no. 1, article 012095. DOI: 10.1088/1742-6596/2176/1/012095.

3. Usmanov A. I., Gorbunov A. V. Change in properties of manmade soil in reclamation using peat–diatomite improver. *MIAB. Mining Inf. Anal. Bull.* 2021, no. 5-2, pp. 283–294. [In Russ]. DOI: 10.25018/0236_1493_2021_52_0_283.

4. Shabanov M. V., Marichev M. S. Assessment of the transformation of natural-territorial complexes in mining technogenesis. *Bulletin of the Tomsk Polytechnic University. Geo Assets Engineering*. 2020, vol. 331, no. 3, pp. 90–99. [In Russ]. DOI: 10.18799/24131830/2020/3/2535.

5. Sokolov A. A., Fomenko O. A., Ignatev I. V. Development of algorithms for control and control of electric power parameters based on information-measuring system data. *Journal of Physics: Conference Series*. 2022, vol. 2176, no. 1, article 012076. DOI: 10.1088/1742-6596/2176/1/012076.

6. Pochechun V. A., Makarov Y. A. Full-scale survey of the Kachkanarsky industrial complex of the Middle Urals and assessment of its impact on the soil. *MIAB. Mining Inf. Anal. Bull.* 2022, no. 11-1, pp. 68–79. [In Russ]. DOI: 10.25018/0236_1493_2022_111_0_68.

7. Elokhin V. A. Geochemical transformation of soil in the influence zone of ash dump in 2006–2020. *MIAB. Mining Inf. Anal. Bull.* 2021, no. 11-1, pp. 98–110. [In Russ]. DOI: 10.25018/0236_1493_2021_111_0_98.

8. Shestopalov V. L., Fomenko V. A., Sokolov A. A., Miroshnikov A. S. Comparative analysis of deformation methods for seismic activity monitoring in mountainous areas of the Black sea coast and Kamchatka. *Sustainable Development of Mountain Territories*. 2021, vol. 13, no. 4. 535–543. [In Russ]. DOI: 10.21177/1998-4502-2021-13-4-535-543.

9. Gashkina N. A., Tatsii Y. G., Udachin V. N., Aminov P. G. Biogeochemical indication of environmental contamination: a case study of a large copper smelter. *Geochemistry International*. 2015, vol. 53, no. 3, pp. 253–264. DOI: 10.1134/S0016702915030076.

10. Hechler J., Udachin V., Aminov P., Beckett P. J., Spiers G. A. Efflorescent sulfate minerals of the Karabash mining/smelting area, Ural mountains, Russia. *Mineralogy*. 2018, vol. 4, no. 4, pp. 96–101.

11. Mayorova L. P., Cherentsova A. A., Krupskaya L. T., Golubev D. A., Kolobanov K. A. Assessment of manmade air pollution due to dusting at mine tailings storage facilities. *MIAB. Mining Inf. Anal. Bull.* 2021, no. 1, pp. 5–20. [In Russ]. DOI: 10.25018/0236-1493-2021-1-0-5-20.

12. Skopintseva O. V., Ganova S. D., Buzin A. A., Fedotova V. P. Measures to reduce dusting during loading and transportation of solid mineral resources. *Gornyi Zhurnal.* 2019, no. 12, pp. 76–79. [In Russ]. DOI: 10.17580/gzh.2019.12.16.

13. Williamson B. J., Purvis O. W., Mikhailova I., Udachin V. SEM-EDX analysis in the source apportionment of particulate matter on Hypogymnia physodes lichen transplants around the Cu smelter and former mining town of Karabash, South Urals, Russia. *Science of the Total Environment.* 2004, vol. 322, no. 1-3, pp. 139–154. DOI: 10.1016/j.scitotenv.2003.09.021.

14. Narayan A., Mora A., Sánchez L., Rosales J. Temporal and spatial variability of heavy metals in bottom sediments and the aquatic macrophyte *Paspalum repens* of the Orinoco River floodplain lagoons impacted by industrial activities. *Environmental Science and Pollution Research.* 2020, vol. 27, pp. 37074–37086. DOI: 10.1007/s11356-020-09623-1.

15. Ren R. H., Tao L., Ren J. Spatial distribution and ecotoxicological assessment of heavy metals in bottom sediments of Yellow River from Inner Mongolia, China. *Geochemistry International.* 2021, vol. 59, no. 13, pp. 1354–1362. DOI: 10.1134/S0016702921100074.

16. Sojka M., Kaluza T., Siepak M., Strzelinski P. Heavy metals concentration in the bottom sediments of the mid-forest reservoirs. *Sylwan.* 2019, vol. 163, pp. 694–704. DOI: 10.26202/sylwan.2019038.

17. Kalekar P., Kamble P., Chakraborti S. Heavy metal contamination in surface sediments of the Upper Bhima Basin, Maharashtra, India. *Environmental Sustainability.* 2022, vol. 5, pp. 507–531. DOI: 10.1007/s42398-022-00252-7.

18. Shabanov M. V. Geochemistry of bottom sediments of the rivers Krasnouralsky promulgation. *News of the Ural State Mining University.* 2019, no. 3(55), pp. 72–78. [In Russ]. DOI: 10.21440/2307-2091-2019-3-72-78.

19. Plokhov A. S., Kharko P. A., Pashkevich M. A. Effect of tailings storage facility on surface water at copper–pyrite deposit. *MIAB. Mining Inf. Anal. Bull.* 2021, no. 4, pp. 57–68. [In Russ]. DOI: 10.25018/0236_1493_2021_4_0_57.

20. Slukovskii Z. I. Geocological assessment of small rivers in the big industrial city based on the data on heavy metal content in bottom sediments. *Meteorology and Hydrology.* 2015, vol. 40, no. 6, pp. 420–426. DOI: 10.3103/S1068373915060084.

21. Muravyeva E. V., Maslennikova N. N., Gibadulina I. I. Features accumulation of heavy metals in the bottom sediments of small rivers. *IOP Conference Series Earth and Environmental Science.* 2022, vol. 988, no. 3, article 032073. DOI: 10.1088/1755-1315/988/3/032073.

22. Passos E. A., Alves J. C., Santos I. S., Alves J. P. H., Garcia C. A., Costa A. C. Assessment of trace metals contamination in estuarine sediments using a sequential extraction technique and principal component analysis. *Microchemical Journal.* 2010, vol. 96, no. 1, pp. 50–57. DOI: 10.1016/j.microc.2010.01.018.

23. Linnik V. G., Bauer T. V., Minkina T. M., Mandzhieva S. S., Mazarji M. Spatial distribution of heavy metals in soils of the flood plain of the Seversky Donets River (Russia) based on geostatistical methods. *Environmental Geochemistry and Health.* 2022, vol. 44, no. 2, pp. 319–333. DOI: 10.1007/s10653-020-00688-y.

24. Slukovsky Z. I., Guzeva A. V., Dauwalter V. A., Udachin V. N., Denisov D. B. Uranium anomalies in modern lake bottom sediments of northern Murmansk region, Arctic. *Geokhimiya.* 2020, vol. 65, no. 12, pp. 1231–1236. [In Russ]. DOI: 10.31857/S0016752520100131.

25. Savel'ev D. E., Snachev V. I., Savel'eva E. N., Bazhin E. A. *Geologiya, petrogeokhimiya i khromitnosnost' gabbro-giperbazitovykh massivov Yuzhnogo Urala* [Geology, petrogeochemistry and chromium content of gabbro-hyperbasite massifs of the Southern Urals], Ufa, Dizayn-PoligrafServis, 2008, 320 p.

26. Rudnic R. L., Gao S. Composition of the continental crust. *Treatise on Geochemistry*. Elsevier, Amsterdam, 2003, 64 p. DOI: 10.1016/B0-08-043751-6/03016-4.
27. Vinogradov A. P. *Geokhimiya redkikh i rasseyannykh elementov v pochvakh* [Geochemistry of rare and trace elements in soils], Moscow, Izd-vo AN SSSR, 1957, 237 p.
28. Yanin E. P. *Tekhnogennyye geokhimicheskie assotsiatsii v donnykh otlozheniyakh malykh rek (sostav, osobennosti, metody otsenki)* [Technogenic geochemical associations in bottom sediments of small rivers (composition, features, methods of assessment)], Moscow, IMGRE, 2002, 52 p.
29. Buat-Menard P., Chesselet R. Variable influence of the atmospheric flux on the trace metal chemistry of oceanic suspended matter Earth Planet. *Earth and Planetary Science Letters*. 1979, vol. 42, no. 3, pp. 398–411.
30. Liu W. H., Zhao J. Z., Ouyang Z. Y., Söderlund L., Liu G. H. Impacts of sewage irrigation on heavy metal distribution and contamination in Beijing, China. *Environment International*. 2005, vol. 31, no. 6, pp. 805–812. DOI: 10.1016/j.envint.2005.05.042.
31. Chatterjee M., Silva F. E. V., Sarkar S. K. Distribution and possible source of trace elements in the sediment cores of a tropical macrotidal estuary and their ecotoxicological significance. *Environment International*. 2007, vol. 33, no. 3, pp. 346–356. DOI: 10.1016/j.envint.2006.11.013.
32. Zhang L., Ye X., Feng H. Jing Y., Ouyang T., Yu X., Liang R., Gao C., Chen W. Heavy metal contamination in Western Xiamen Bay sediments and its vicinity. *Marine Pollution Bulletin*. 2007, vol. 54, no. 7, pp. 974–982. DOI: 10.1016/j.marpolbul.2007.02.010.
33. Sutherland R. Bed sediment associated trace metals in an urban stream, Oahu, Hawaii. *Environmental Earth Sciences*. 2000, vol. 39, no. 6, pp. 611–627. DOI: 10.1007/s002540050473.
34. Belogub E. V., Udachin V. N., Korablev V. V. *Karabashskiy rudnyy rayon (Yuzhnyy Ural)* [Karabashsky ore district (Southern Urals)], Miass, IMin UrO RAN, 2003, 40 p.
35. Chen J., An Z. S., Head J. Variation of Rb/Sr Ratios in the Loess-Paleosol Sequences of Central China during the Last 130,000 Years and Their Implications for Monsoon Paleoclimatology. *Quaternary Research*. 1999, vol. 51, no. 3, pp. 215–219. DOI: 10.1006/qres.1999.2038.
36. Zhang J., Liu C. L. Riverine composition and estuarine geochemistry of particulate metals in China – weathering features, anthropogenic impact and chemical fluxes. *Estuarine Coastal and Shelf Science*. 2002, vol. 54, no. 6, pp. 1051–1070. DOI: 10.1006/ecss.2001.0879.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

*Шабанов Михаил Викторович*¹ – канд. с.-х. наук,
доцент, e-mail: geohim.spb@gmail.com,
Scopus Author ID: 35171489500,
ORCID ID: 0000-0003-4725-3673,
*Маричев Максим Сергеевич*⁴ – канд. биол. наук,
зав. лабораторией,
e-mail: m.s.marichev@yandex.ru,
Scopus Author ID: 57216298057,
ORCID ID: 0000-0003-0429-2234,
*Минкина Татьяна Михайловна*² – д-р биол. наук,
профессор, зав. кафедрой,
e-mail: minkina@sfedu.ru,
Scopus Author ID: 15063165400,
ORCID ID: 0000-0003-3022-0883,
*Раджпут Вишну Даял*² – PhD, канд. биол. наук,
ведущий научный сотрудник,

e-mail: rajput.vishnu@gmail.com,
Scopus Author ID: 56516545100,
ORCID ID: 0000-0002-6802-4805,
*Бауэр Татьяна Владимировна*² – PhD,
канд. биол. наук, старший научный сотрудник,
e-mail: bauertatyana@mail.ru,
Scopus Author ID: 55928833000,
ORCID ID: 0000-0002-6751-8686,

¹ Санкт-Петербургский государственный
аграрный университет,

² Южный федеральный университет.

Для контактов: Маричев М.С., e-mail: m.s.marichev@yandex.ru.

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

*M.V. Shabanov*¹, Cand. Sci. (Agric.),
Assistant Professor,

e-mail: geohim.spb@gmail.com,
Scopus Author ID: 35171489500,
ORCID ID: 0000-0003-4725-3673,

*M.S. Marichev*¹, Cand. Sci. (Biol.),
Head of Laboratory,

e-mail: m.s.marichev@yandex.ru,
Scopus Author ID: 57216298057,
ORCID ID: 0000-0003-0429-2234,

*T.M. Minkina*², Dr. Sci. (Biol.), Professor,
Head of Chair, e-mail: minkina@sfedu.ru,

Scopus Author ID: 15063165400,
ORCID ID: 0000-0003-3022-0883,

*V.D. Rajput*², PhD, Cand. Sci. (Biol.),
Leading Researcher,

e-mail: rajput.vishnu@gmail.com,
Scopus Author ID: 56516545100,
ORCID ID: 0000-0002-6802-4805,

*T.V. Bauer*², PhD, Cand. Sci. (Biol.),
Senior Researcher,

e-mail: bauertatyana@mail.ru,
Scopus Author ID: 55928833000,
ORCID ID: 0000-0002-6751-8686,

¹ Saint-Petersburg State Agrarian University,
Saint-Petersburg, Pushkin, Russia,

² Southern Federal University,
344006, Rostov-on-Don, Russia,

² Southern Federal University,
344006, Rostov-on-Don, Russia.

Corresponding author: M.S. Marichev, e-mail: m.s.marichev@yandex.ru.

Получена редакцией 10.01.2023; получена после рецензии 15.03.2023; принята к печати 10.04.2023.

Received by the editors 10.01.2023; received after the review 15.03.2023; accepted for printing 10.04.2023.

