УДК 631.41

DOI: 10.25018/0236_1493_2023_51_0_86

ВЛИЯНИЕ ТЕХНОГЕННЫХ ПОТОКОВ НА ФОРМИРОВАНИЕ ГЕОХИМИЧЕСКОГО ФОНА Se и Te B ПОЧВАХ РАЙОНА МЕДНО-КОЛЧЕДАННЫХ МЕСТОРОЖДЕНИЙ СОЙМОНОВСКОЙ ДОЛИНЫ

М.В. Шабанов¹, М.С. Маричев¹, Т.М. Минкина², Д.Г. Невидомская², В.А. Шуваева²

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: В Соймоновской долине Челябинской области на протяжении более 100 лет ведется деятельность по переработке медно-колчеданных руд с целью получения черновой меди на горнопромышленном предприятии «Карабашмедь». Сам процесс переработки включает в себя стадии измельчения и флотации. В результате вблизи горнопромышленного комплекса, на территории Соймоновской долины, складируются миллионы тонн шлакоотвалов, хвостов обогащения. В дополнение к газопылевым выбросам и пылевым потокам с отвалов старых шахтных выработок на данной территории сформировалась Карабашская геохимическая аномалия. Основной удар на себя в ходе миграции элементов, вовлеченных в геохимический круговорот, принимают такие депонирующие среды, как почвы. В результате общая геоэкологическая обстановка долины ухудшается. В процессе технологического цикла предприятия, при выплавке меди, мало внимания уделяется улавливанию таких сопутствующих элементов, как Se и Te, которые в свою очередь при высоких концентрациях являются опасными для здоровья человека. Рассмотрены основные источники поступления Se и Te в почвы Соймоновской долины. В ходе работ заложено 25 почвенных разрезов с целью исследования уровня загрязненности данными элементами. В отобранных почвенных образцах определены кислотность почв, доля углерода органического вещества, гранулометрический состав, валовое содержание Se и Те. Количественное содержание поллютантов в почвах определялось методом рентгенфлуоресцентной дисперсионной спектроскопии. По результатам полученных лабораторных исследований определено эколого-геохимическое состояние почв с расчетом коэффициента концентрации Кс. Определены фоновые концентрации исследуемых поллютантов в почвах: для Se – 0,26 мг/кг, Te – 0,06 мг/кг, с учетом уровня загрязненности территории. Выявлены локальные участки с высоким содержанием Se и Te в почвах, составлены карто-схемы пространственного распределения. Установлены области с превышением фона для Se и Te в 18 и 51 раз соответственно. Результаты данной работы могут способствовать решению проблемы управления экологической безопасностью региона и модернизации производственного цикла горного предприятия с целью недопущения поступления элементов в почвы.

Ключевые слова: Соймоновская долина, геохимические аномалии, Карабаш, техногенез, Se и Te в почвах, загрязнение почв, горнопромышленный комплекс, медно-колчеданные месторождения, хвостохранилища.

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

© М.В. Шабанов, М.С. Маричев, Т.М. Минкина, Д.Г. Невидомская, В.А. Шуваева. 2023.

Для цитирования: Шабанов М. В., Маричев М. С., Минкина Т. М., Невидомская Д. Г., Шуваева В. А. Влияние техногенных потоков на формирование геохимического фона Se и Te в почвах района медно-колчеданных месторождений Соймоновской долины // Горный информационно-аналитический бюллетень. – 2023. – № 5-1. – С. 86–103. DOI: 10. 25018/0236_1493_2023_51_0_86.

Manmade flow impact on geochemical background of Se and Te in soil in copper-pyrite mining region in the Soimonov valley

M.V. Shabanov¹, M.S. Marichev¹, T.M. Minkina², D.G. Nevidomskaya², V.A. Shuvaeva²

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: The copper pyrite ore mining and processing has been carried out in the Soimonov valley in the Chelyabinsk Region for more than 100 years, with crude copper production at Karabashmed. The treatment process includes milling and flotation. As a consequence, in the Soimonov valley, in the neighborhood of the mining and processing activities, millions of tons of slugs and tailings are put into storage. In addition to gas and dust emission and dust flows from the dumps of the old mines, the Karabash geochemical anomaly has set in this area. The bulk of impact in the course of migration of elements involved in the geochemical circulation is taken by such repository media as soils. As a result, the overall geoecological situation in the valley worsens. The work cycle of copper smelting avoids capitation of such associate elements as Se and Te, which are greatly dangerous to health if reach high concentrations. The article examines the sources of Se and Te in soils in the Soimonov valley. The studies included setting of 25 soil sections to analyze the rate of pollution of soil with the listed elements. The soil samples were tested for the acidity, organic carbon content, grain size composition and gross Se and Te. The amount of the pollutants in soils was determined by the method of energy dispersive X-ray fluorescence spectroscopy. Using the lab-scale testing results, the eco-geochemical condition of soil was determined based on the calculated concentration factor Kc. The background concentrations of the test pollutants in soil are found: Se = 0.26 mg/kg; Te = 0.06 mg/kg, with regard to the regional pollution level. The local sites with the high contents of Se and Te are detected in soil, and their spatial distributions are mapped. The areas of the increased Se and Te background by 18 and 51 times, respectively, are delineated. The research findings can contribute to more efficient ecological control and safety in the region, and to the process cycle upgrading to eliminate entrance of hazardous elements in soil.

Key words: Soimonov valley, geochemical anomaly, Karabash, techno genesis, Se and Te in soil, soil pollution, mining and processing integrated works, copper-pyrite deposit, tailings storage.

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., Nevidomskaya D. G., Shuvaeva V. A. Manmade flow impact on geochemical background of Se and Te in soil in copperpyrite mining region in the Soimonov valley. *MIAB. Mining Inf. Anal. Bull.* 2023;(5-1):86-103. [In Russ]. DOI: 10.25018/0236_1493_2023_51_0_86.

Введение

Карабашская техногенная аномалия образовалась в результате многолетней

работы по добыче меди и золота в Соймоновской долине, а также последующего строительства и развития горнопромышленного комплекса (ГК). На данной территории сосредоточены медноколчеданные месторождения и россыпи золота. Соймоновская долина расположена в окружении гор: на севере — Собачьи, на западе — Сунгурские, на северо-западе — Уфимские, на востоке — Золотая гора.

На широте Соймоновской долины, приуроченной к зоне главного Уральского хребта, геологическое строение сформировано из серпентинизированных ультраосновных пород (О₂₋₃), залегающих среди океанических и островодужных осадочно-вулканогенных комплексов Магнитогорского мегасинклинория (S-D) [1].

Девонские вулканогенно-осадочные породы, преимущественно мраморизованные известняки, метаморфизованные туфы базальтовых порфиритов, туфопесчаники, вмещают Карабашскую группу медно-колчеданных месторождений [2].

В связи с богатством залежей медных руд в Соймоновской долине еще в XIX в. было налажено горнодобывающее, а по истечении времени и горнопромышленное производство, которое после ряда модернизаций функционирует и по настоящее время, уже на протяжении более 100 лет.

На территории Соймоновской долины, а именно на Барнинском, Пионерском, Сталинском и Первомайском месторождениях, велась добыча меди шахтным способом. В процессе добычи на поверхность было извлечено огромное количество руды, а рядом с выработками складированы тонны отвальной породы. По мере исчерпания месторождений производственные линии были переквалифицированы, а во второй половине XX в. шахты были окончательно закрыты и затоплены, что в данный момент ухудшает геоэкологическую обстановку [3, 4].

В результате деятельности горных предприятий на территории долины ланд-

шафты претерпели значительные изменения. Складируются миллионы тонн отработанной породы горных выработок, хвосты обогащения переработанной породы и шлакоотвалы [5 – 7]. В совокупности с газопылевыми выбросами горнопромышленного комплекса [8] создаются обильные техногенные потоки, оказывающие прямое влияние на изменение естественных ландшафтов и преобразование их в техногенные [9 – 12].

Сложность рельефа создает определенные преграды для циркуляции атмосферного воздуха, в результате чего значительная часть газопылевых выбросов ГК и аэрогенный перенос с хвостохранилищ, шлакоотвалов и выработок шахт оседает в Соймоновской долине. Обильные выбросы Карабашского медеплавильного комбината подтверждены со снимков спутников NASA в 2015 г.; по данным статьи канадских ученых, выбросы в атмосферу одного диоксида серы превышают нормы по допустимым выбросам более чем в 3 раза [13].

Минерализация колчеданных руд помимо основных халькофильных элементов содержит элементы примеси, такие как Se и Te; последние достаточно токсичны в высоких концентрациях [14, 15], особенно в форме теллурита и селенита, а сульфиды железа, такие как пирит, рассматриваются как потенциальный источник этих элементов в окружающем ландшафте [16]. Пирит является одним из основных минералов гидротермальных рудных месторождений, содержит в качестве изоморфных примесей селен и Те и служит источником целого ряда элементов, таких как As, Se, Sb, Te и Bi [17 - 20].

В связи с этим на местах добычи и переработки медно-колчеданных руд существует высокий риск вовлечения в геохимический цикл миграции ряда элементов, не извлекаемых при добыче и переработке меди, среди которых Se и Te, что в свою очередь ведет к их накоплению в таких депонирующих средах, как почвы. Высокие концентрации Se и Te в почвах несут потенциальную угрозу здоровью человека, в связи с чем необходим тщательный контроль над их содержанием в почвах, особенно в районах разработок медно-колчеданных месторождений и местах их переработки.

На протяжении всего ХХ в. в связи с нарастанием мощностей горнопромышленного комплекса и отсутствием современных технологий, уменьшающих экологическую напряженность на ландшафты, переработку хвостов обогащения и шлакоотвалов, геоэкологическая обстановка территории Соймоновской долины ухудшалась [21]. Как следствие, за счет увеличения массы отвалов и усиления газопылевых потоков концентрации Se и Te в депонирующих средах возрастают [22 — 24]. Такое воздействие напрямую оказывает негативное влияние на почвы, изменяется общий геохимический фон [25, 26].

В настоящее время многие ученые уделяли внимание геоэкологической проблеме Карабашской техногенной аномалии [27 – 29], но практически не встречается работ с информацией о содержании в почвах таких элементов, как Se и Te, которые не улавливаются в цикле при выплавке меди из медно-колчеданных руд. В связи с этим целью данной работы является исследование изменения геоэкологического состояния почв и фонового содержания Se и Te в районе медно-колчеданных месторождений Соймоновской долины.

На основании полученных данных по содержанию Se и Te в почвах возможна корректировка общего геохимического фона Соймоновской долины. Результаты данной работы могут служить решению проблемы управления экологической безопасностью региона [30] и модернизации производственного цикла горного предприятия, с целью недопущения поступления элементов в почвы.

Материалы и методы

При оценке влияния техногенных потоков со шлакоотвалов, хвостохранилищ, старых шахтных выработок и газопылевых выбросов горнопромышленного комплекса на окружающие ландшафты необходимо учитывать геоморфологические особенности местности. С целью определения уровня загрязненности почв в Соймоновской долине производилось заложение почвенных разрезов на различных направлениях и отдаленности от основных источников предполагаемого загрязнения (рис. 1).

В ходе отбора почвенных образцов проводилось морфологическое описание почвенных разрезов. В результате почвы были классифицированы как темносерые (почвенные разрезы 1, 7 10, 15, 23, 24) и серые лесные — Phaeozems (почвенные разрезы 2, 9, 18, 19), литоземы серогумусовые — Leptosols dystric, grey-humus (почвенные разрезы 6, 11, 13, 25) и темногумусовые — Leptosols dystric, dark-humus (разрезы 17, 22, 23), стратоземы урбостратифицированные (почвенные разрезы 5, 12, 16) и водноаккумулятивные — Umbrisols (почвенный разрез 3), торфяная эутрофная — Histosols (почвенный разрез 4), стратозем — Umbrisols (почвенный разрез 14), серогумусовая аллювиальная — Fluvisols gleivic (разрез 8), петрозем — Leptosols lithic (почвенный разрез 20), дерново-подзолистая — Luvisols albic (почвенный разрез 21) (см. рис. 1) [31, 32].

В отобранных почвенных образцах, согласно общепринятым методикам, определялись следующие показатели: кислотность почв (ГОСТ 26423-85), содержание углерода органического вещества (ГОСТ 26213-2021), гранулометрический состав почв (ГОСТ 12536-2014). Количественное определение валового



Рис. 1. Карта района работ с обозначением площадок отбора проб почв Fig. 1. Map of the work area with the soil sampling sites

Те и Se проводилось методом рентгенфлуоресцентной дисперсионной спектроскопии по ГОСТ 33850-2016. Подготовленную пробу почвы по ГОСТ ISO 11464 измельчали с дальнейшим просеиванием через сито диаметром 100 мкм. Измельченную пробу помещали в полую кювету, дно которой сформировано полиэтиленовой пленкой.

Проведение расчета фоновых концентраций осуществлялось по методике, предложенной В.А. Алексеенко [33], путем выборки значений и построения закона распределения дальнейшего расчета логарифмов содержаний элементов среднеквадратичного отклонения выборки. В качестве определения уровня загрязнения почв исследуемой территории проводили расчет коэффициента концентрации (*Kc*) Se и Te (СанПиН № 1.2.3685-21).

В качестве сравнения и доказательства причастности поступления исследуемых поллютантов в почву аэрогенным путем сравнивались значения валовых концентраций Se и Te и определяемых показателей в верхнем (0 — 15 см) слое почвы и на глубине 60 см, в горизонтах, примыкающих к материнской породе.

Результаты

Кларковые значения среди исследуемых элементов металлоидов в земной коре составляют для Se 0,05 мг/кг, для Te — 0,002 мг/кг [34]. Оба элемента находятся в незначительных количествах в верхней части континентальной земной коры, а в почвах мира кларк известен лишь для Se — 400 мкг/кг [35], для Te имеются отрывочные данные, причем разброс их составляет довольно широкий диапазон — 0,35 — 10,00 мг/кг [36]. В ходе расчетов определены фоновые концентрации в почвах Соймоновской долины, которые составляют для Se 0,29± ±0,03 мг/кг, для Te 0,06±0,02 мг/кг.

Расчет геохимического фона Se и Te в почвах проводился путем выборки полученных концентраций элементов среди нижних горизонтов почв, примыкающих к материнской породе. На рис. 2 видна асимметричность частоты встречаемости элементов, следовательно, расчет фоновых концентраций необходимо проводить по логнормальному закону распределения [34].

Наибольшая частота встречаемости концентраций в почвах исследуемых территорий составляет: для Se в районе 0,2 мг/кг, для Te в районе 0,05 мг/кг.

Исследуемая территория Соймоновской долины была условно разделена на зоны в зависимости от расположения источников эмиссии. В качестве контрольного участка, как наиболее загрязненного, имеющего наибольшее количество типов источников техногенных потоков, была выбрана территория горнопромышленного комплекса.

По определяемым физико-химическим параметрам (см. таблицу) почвы на расстоянии до 2 км от комбината характеризуются слабокислой и близкой к нейтральной реакцией среды (почвенные разрезы 2 – 5); доля углерода органического вещества составляет от 6,07 до 29,20%, гранулометрический состав почв преимущественно легкосуглинистый (почвенные разрезы 1 – 5), за исключением почвенного разреза 7 – тяжелосуглинистый.

С отдалением от горнопромышленного комплекса на расстояние до 5 км в физико-химические параметры изменяются — наблюдается увеличение кислотности верхней почвенной толщи (0 — 15 см) до сильнокислой (почвенные разрезы 14, 15, 18, 23) и среднекислой (почвенные разрезы 6, 9, 24) реакции среды. Углерод органического вещества находится в пределах 4,23 — 14,26%. По гранулометрическому составу почвы становятся более неоднородны, изменяясь от супесчаных до тяжелосуглинистых. Отчетливо прослеживается тенденция о накоплении фракции <0,001 мм в нижней части профиля.

В третьей зоне (см. таблицу) имеются локальные области с реакцией среды 3,05 — 3,07 ед. рН (почвенные разрезы 11 и 12). Остальные почвы преимущественно средне- и слабокислые. Доля углерода органического вещества в разрезах 16, 19, 20 составляет 1,23 — 1,91%, в остальных почвах данной зоны — 6,96 — 12,69%. По гранулометрическому составу отчетливо заметна тенденция уменьшения фракций <0,001 мм в нижней части профиля, почвы преимущественно средне- и тяжелосуглинистые.

В наиболее отдаленных участках исследуемой территории, на расстоянии далее 10 км от комбината, pH верхней (0—15 см) толщи почв изменяется от 3,25 до 4,90 ед., а далее 25 км — увеличивается до 5,59 ед. Углерод органического вещества содержится в диапазоне 5,78—13,22%, в разрезе 17—3,82%. Гра-



Рис. 2. Частота встречаемости концентраций Se и Te в нижних горизонтах исследуемых почв Fig. 2. Frequency of Se and Te concentrations in the lower horizons of the studied soils

Физико-химические показатели и содержание Se и Te в почвах Соймоновской долины

Physico-chemical parameters, Se, and Te content in soils of the Soimonov Vall

Почвенный разрез	pΗ _{κcι}	C _{opr} , %	Частицы <0,01 мм, %	Частицы <0,001 мм, %	Te, ppm	Se, ppm	<i>K</i> c […] , Se / Te					
Зона 1 (до 2 км от горнопромышленного комплекса)												
1	5,53±0,01	8,25±0,12	28,10±0,15	<u>5,40±0,12</u> 14,60±0,12	<u>1,10</u> 0,11	<u>15,0</u> 1,20	<u>51,7</u> 18,3					
2	5,93±0,08	8,67±0,14	26,18±0,16	<u>4,71±0,13</u> 14,41±0,14	<u>0,05</u> 0,06	<u>0,50</u> 1,10	<u>1,7</u> 0,8					
3	6,06±0,07	14,69±0,16	23,30±0,11	<u>3,90±0,10</u> 7,20±0,12	<u>0,20</u> 0,19	<u>1,70</u> 2,60	<u>5,8</u> 2,3					
4**	6,07±0,40	29,20±0,85	_	_	<u>0,90</u> 0,20	<u>15,0</u> 1,40	<u>51,7</u> 15,0					
5	6,54±0,01	6,19±0,11	30,40±0,12	<u>6,30±0,10</u> 8,60±0,11	<u>0,10</u> 1,10	<u>1,20</u> 12,0	<u>4,1</u> 1,7					
7	4,15±0,01	6,07±0,12	51,00±0,18	<u>20,90±0,17</u> 33,60±0,13	<u>0,90</u> 0,05	<u>14,0</u> 0,10	<u>48,3</u> 15,0					
	3он	на 2 (2–5 км	от горнопром	ышленного ко	мплекса)							
6	5,15±0,02	14,26±0,01	22,80±0,13	<u>7,20±0,16</u> 27,20±0,18	<u>0,16</u> 0,11	<u>2,30</u> 1,20	<u>7,9</u> 2,7					
9	4,94±0,01	4,23±0,02	22,06±0,11	<u>5,00±0,11</u> 11,18±0,10	<u>1,10</u> 0,05	<u>1,20</u> 0,10	<u>4,2</u> 1,7					
14	4,35±0,01	8,33±0,15	57,27±0,19	<u>32,93±0,18</u> 14,71±0,16	<u>0,33</u> 0,20	<u>3,40</u> 2,10	<u>11,7</u> 5,5					
15	4,04±0,01	8,40±0,09	41,76±0,12	<u>17,25±0,18</u> 12,94±0,14	<u>0,26</u> 0,05	<u>2,40</u> 0,50	<u>8,3</u> 4,3					
18	4,55±0,02	5,95±0,10	23,24±0,12	<u>4,71±0,11</u> 5,29±0,12	<u>0,36</u> 0,25	<u>4,02</u> 0,40	<u>8,9</u> 6,0					
23	3,92±0,01	7,89±0,46	17,06±0,10	<u>8,24±0,10</u> 20,00±0,16	<u>0,40</u> 0,05	<u>3,20</u> 0,11	<u>8,3</u> 3,2					
24	4,81±0,01	11,02±0,15	21,18±0,10	<u>12,64±0,13</u> 34,71±0,18	<u>0,82</u> 0,05	<u>4,80</u> 0,20	<u>8,9</u> 3,5					
Зона 3 (5–10 км от горнопромышленного комплекса)												
8	5,37±0,01	6,96±0,26	7,35±0,10	<u>2,65±0,10</u> 8,24±0,10	<u>0,15</u> 0,11	<u>0,50</u> 1,20	<u>7,2</u> 2,5					
11	3,07±0,01	12,69±0,70	32,50±0,16	<u>14,20±0,12</u> 23,60±0,16	<u>0,26</u> 0,19	<u>2,40</u> 2,60	<u>8,3</u> 4,3					
12	3,05±0,02	11,43±0,11	40,29±0,14	<u>9,41±0,10</u> 7,94±0,10	<u>1,10</u> 0,12	<u>15,0</u> 1,50	<u>51,7</u> 18,3					
16	5,49±0,02	1,91±0,12	22,35±0,13	<u>14,71±0,14</u> 11,76±0,15	<u>1,10</u> 0,90	<u>13,0</u> 16,0	<u>44,8</u> 18,3					
19	5,49±0,03	1,23±0,10	35,29±0,17	<u>14,71±0,10</u> 4,71±0,18	<u>0,20</u> 0,06	<u>0,5</u> 1,40	<u>1,7</u> 0,8					

20	4,24±0,01	1,42±0,12	16,28±0,18	<u>11,02±0,10</u> 3.11±0.18	<u>0,16</u> —	<u>2,20</u> —	<u>7,6</u> 2.7			
22	4.04±0.20	11.09±0.20	24.71±0.11	<u>15,88±0,11</u>	<u>0,46</u>	<u>2,80</u>	<u>9,6</u>			
	1,01 0,20	11,07 0,20	2 1,7 2 0,22	11,76±0,12	0,16	2,00	7,7			
Зона 4 (10-20 км от горнопромышленного комплекса)										
10	4,16±0,02	5,78±0,12	31,10±0,12	<u>6,70±0,17</u>	<u>0,11</u>	<u>2,10</u>	<u>7,2</u>			
				33,60±0,17	0,05	0,20	1,8			
13	4,90±0,05	13,22±0,40	20,00±0,10	<u>9,40±0,16</u>	<u>0,42</u>	<u>2,80</u>	<u>9,6</u>			
				8,40±0,12	0,90	2,60	7,0			
21	4,04±0,01	6,44±0,01	30,65±0,18	12,94±0,16	0,18	1,30	4,5			
				21,18±0,14	0,05	0,11	3,0			
25	7 25+0.00	0 1 0 + 0 20	14 00+0 10	2,82±0,15	0,40	3,40	<u>11,7</u>			
25	5,25±0,06	9,18±0,20	14,09±0,10	6,76±0,12	0,17	2,10	5,5			
Зона 5 (более 20 км от горнопромышленного комплекса)										
17	5,59±0,01	3,82±0,12	25,00±0,12	7,94±0,12	0,05	0,50	1,7			
				18,24±0,13	0,17	2,40	0,8			
Примечание: *В числителе содержание компонента в 0-15 см толще, в знаменателе на глубине 60 см.										
"Петрозем — определение гранулометрического состава не проводилось. " <i>Кс</i> — коэффициент кон-										
центрации элементов, рассчитанный как отношение концентраций элемента в верхней (0—15 см) толще										

почв и на глубине 60 см, прилегающей к материнской породе; в числителе для Se, в знаменателе для Te.

нулометрический состав почв неоднороден, изменяется от супесчаного (почвенный разрез 25) до среднесуглинистого (почвенный разрез 10). Доля фракций <0,001 мм накапливается преимущественно в нижней части профиля.

Селен

Почвы Южного Урала в основном имеют низкие концентрации Se, не превышающие кларк в земной коре [34, 35]. Se содержится в организме человека и животных как микроэлемент, однако для последних он токсичен при содержании его в корме более 3—15 мг/кг [35, 36], а накопление его в кормах травянистой растительности может поступать непосредственно из почв.

В почвах первой зоны, не далее 2 км от ГК, зафиксированы высокие концентрации Se в верхней (0—15 см) толще почвы (почвенные разрезы 1, 4, 7), превышение фона составляет 50—53 раза. В серой лесной почве (почвенный разрез 2), стратоземе водно-аккумулятивном (почвенный разрез 3) и стратоземе урбостратифицированном (почвенный разрез 5) превышения составляют 1,7 — 6 раз относительно фона. В данных почвах наблюдается тенденция внутрипрофильного распределения, в нижних горизонтах почв концентрации возрастают от 2 до 10 раз.

Во второй зоне, на расстоянии в 2— 5 км от ГК, во всех разрезах в верхней почвенной толще 0 – 15 см превышение фона составляет в среднем в 8-17 раз. В отличие от предыдущей зоны, на данных территориях в нижней почвенной толще на глубине 60 см концентрации Se приближены к фоновым значениям и варьируются в диапазоне 0,1 — 0,5 мг/кг, что свидетельствует о прочности закрепления поллютанта, за исключением литозема серогумусового (почвенный разрез 6), в котором происходит аккумуляция в переотложенных илистых частицах нижних горизонтов и погребенном горизонте стратозема (почвенный разрез 14).

В следующей зоне, на отдалении 5— 10 км от ГК, вновь наблюдается резкий рост концентраций Se в толще почв 015 см. Так, в стратоземах урбостратифицированных (почвенные разрезы 12, 16) содержание варьируется от 13,0 до 15,0 мг/кг, что выше фона в 46 и 53 раза соответственно. В остальных почвах данной зоны превышения составляют 8— 10 раз, за исключением серогумусовой аллювиальной (почвенный разрез 8) и серой лесной (почвенный разрез 19), находящейся в южном и юго-западном направлении от комбината.

В наиболее отдаленных территориях, входящих в 4 и 5 зоны (см. таблицу), наблюдается отсутствие проявления локальных участков с высокими концентрациями Se в толще почвы 0-15 см. Превышение фона составляет 4.5-11 раз. Во внутрипрофильном распределении к нижним горизонтам наблюдается уменьшение концентраций в сравнении с верхними в литоземах серогумусовых (почвенные разрезы 13 и 25) в 1,5 раза, в темно-серой лесной и дерново-подзолистой почвах в 10 раз (почвенные разрезы 10 и 21). В литоземе темногумусовом на расстоянии более 20 км от комбината (почвенный разрез 17) селен аккумулируется в нижней части профиля — 2,40 мг/кг, превышение относительно фона в 14,5 раз.

Теллур

Как отмечается рядом ученых, данный элемент при высоких концентрациях является токсичным для животных и человека [37 — 39]. В сравнении с другими халькофильными металлоидами, Те мало изучен, в том числе и его поведение в почве.

На исследуемой территории, в зоне 2 км от горнопромышленного комплекса, концентрации Те в верхней (0 – 15 см) толще почв выше фона в 1,6 – 18,3 раз (см. таблицу). Максимальные концентрации зафиксированы в темно-серых лесных почвах (почвенные разрезы 1, 7) – 1,10 мг/кг. Общая закономерность внутрипрофильной дифференциации заключается в уменьшении концентрации к нижним горизонтам, за исключением стратозема урбостратифицированного (почвенный разрез 5), в котором на глубине 60 см Те аккумулируется до значений 1,10 мг/кг.

С отдалением от ГК на расстояние до 2—10 км (зоны 2 и 3) превышение фона в верхнем (0-15 см) слое почвы составляет 2,6-6,0 раз. Максимум зафиксирован в серогумусой почве (почвенный разрез 9) и стратоземах урбостратифицированных (почвенные разрезы 12, 16) — 1,10 мг/кг, что выше фона в 18,3 раза. Во всех почвах данной зоны с глубиной концентрация Те уменьшается в среднем в 4—6 раз, а в серогумусовой (почвенный разрез 15), темногумусовой (почвенный разрез 23) и темно-серой лесной почвах (почвенные разрезы 15, 24) не превышает фоновые значения. С отдалением до 10 км в нижних горизонтах зафиксирован рост концентраций в среднем на 50% в сравнении с почвами второй зоны (см. таблицу).

В наиболее отдаленных участках, более 10 км от ГК (зоны 4 и 5), в сравнении с зонами 1, 2, и 3, наблюдается общая тенденция уменьшения концентраций Те в толще почвы 0-15 см в среднем в 2 раза. В разрезах 13 и 17, на глубине 60 см, в сравнении с верхними горизонтами увеличивается содержание Те в 2-3 раза. В литоземе темногумусовом на расстоянии далее 20 км (почвенный разрез 17), в верхних горизонтах концентрации не превышают фоновые значения, как и в темно-серой (разрез 10) и дерново-подзолистой почвах (почвенный разрез 21) на глубине 60 см.

Обсуждение результатов

В результате влияния комплекса техногенных потоков рассеивания, исходящих преимущественно с территории горнопромышленного комплекса, в совокупности с участками, на которых складируются отвалы бывших шахтных выработок, шлакоотвалы и хвосты обогащения (см. рис. 1), окружающие ландшафты претерпевают геохимическую трансформацию. В почвах исследуемой территории сформировались несколько локальных областей с высокими концентрациями Se и Te, превышающими фоновые значения (рис. 3).

Так, на расстоянии до 2 км от горнопромышленного комплекса содержание Se и Te в толще почвы 0 — 15 см неоднородно. Высокий разброс в значениях в пределах одной зоны объясняется разными геоморфологическими особенностями местности. Почвенные разрезы 1, 4, 7 расположены выше по склону горных массивов относительно разрезов 2, 3 и 5, расположенных у подножья. Тем самым почвы у подножья подвержены большему воздействию водных потоков, которые осуществляют перенос подвижных соединений Se и Te в нижние горизонты. Вторым немаловажным фактором в аккумуляции данных элементов в верхней части профиля является



Рис. 3. Карта-схема пространственного распределения Se и Te в 0—15 см слое почвы Соймоновской долины: Se, мг/кг (а); Te, мг/кг (б)

Fig. 3. Schematic map of the spatial distribution of Se and Te in the 0–15 cm soil layer of Soimonov Valley: Se, mg/kg (a); Te, mg/kg (b)

высокая доля органического вещества. Подвижность Se в почве зависит от химической формы и его видообразования [40, 41]. В свою очередь, при кислой реакции среды и высокой доле органического вещества образуются преимущественно соединения селенита, которые быстро сорбируются на положительно заряженных ионах диффузным слоем почвенно-поглощающего комплекса путем хемосорбции.

С отдалением от ГК на расстояние 2— 5 км наблюдается незначительное уменьшение концентраций Se и Te в толще почвы 0—15 см в среднем на 10—15% в сравнении с зоной № 1. Те и Se проявляют высокое сродство с гидроксидами железа и весьма конкурентны в отношении других анионов [42]. Таким образом, вероятно, за счет высоких концентраций сульфатов в данных почвах [43] соединения Se и Te уступают при конкурентной сорбции, происходит переход соединений Se в подвижную фазу [44].

На расстоянии 5-10 км от комбината в ряде локальных зон (почвенные разрезы 12, 16) отмечено резкое увеличение содержания Se и Te. Данные почвы расположены на горном массиве, который является естественным барьером на пути распространения аэропромвыбросов. Аккумуляция происходит преимущественно в толще почвы 0-15 см. Увеличение концентрации Se и Te к нижним горизонтам в стратоземе урбостратифицированном (почвенный разрез 16) происходит за счет малого содержания органического вещества и смены в верхней части профиля реакции среды на слабокислую. В результате соединения Se и Te становятся более мобильными и мигрируют вниз по профилю. Аналогичная ситуация наблюдается в серогумусой почве (почвенный разрез 19) и на более отдаленных территориях (почвенный разрез 13 и 17). На расстоянии далее 10 км концентрации Те в верхней части профиля почв (почвенный разрез 17) ниже фоновых, как и в нижних горизонтах для Se и Te — в темно-серой и дерново-подзолистой почвах (почвенные разрезы 10, 21).

На рис. 3 отчетливо заметны две локальные зоны с высокими концентрациями поллютантов. Расчетные значения коэффициента концентрации *Кс* подтверждают теорию поступления исследуемых поллютантов путем аэрогенного массопереноса техногенными потоками с участков складирования шлакоотвалов, хвостов обогащения, старых шахтных выработок, в совокупности с газопылевыми выбросами комбината. В данных областях значения *Кс*, рассчитанного для верхней (0 – 15 см) толщи почвы составляют для Se >40, для Te >15.

Заключение

В ходе проведенных работ по исследованию почв территории Соймоновской долины установлено несколько групп техногенных потоков, несущих в себе такие поллютанты, как Se и Te. Данные потоки рассеивания складываются из газопылевых выбросов горнопромышленного комплекса, аэрогенного и гидрогенного массопереноса пылевых частиц шлакоотвалов, хвостов обогащения и мест складирования породы со старых шахтных выработок. В зоне 10 км установлены высокие концентрации Se и Te в почвах, превышающие кларковые и фоновые концентрации. Определены местные региональные фоновые значения для Se — 0,29 мг/кг, для Te — 0,06 мг/кг, что является выше мирового кларка в 5,9 и 30 раз соответственно.

В результате обрамления Соймоновской долины горными массивами, в восточном и западном направлениях, образуются локальные области с аномально высокими концентрациями Se и Te. Внутрипрофильное поведение данных элементов в почвах регламентируется преимущественно изменениями кислотно-основных свойств почв и содержания органического вещества, которые выступают в качестве геохимических барьеров и способствуют накоплению Se и Te в верхних горизонтах почв. Так, в темно-серых гумусовых почвах (почвенные разрезы 1, 4), стратоземах урбостратифицированных (почвенные разрезы 12, 16) и торфяной эутрофной почве (почвенный разрез 7, концентрации в верхних горизонтах почв составляют: для Se — 15.0 мг/кг, для Te — 1,10 мг/кг, что выше фона в 51 и 18 раз соответственно. Таким образом, территории медноколчеданных месторождений, особенно в совокупности с производством по переработке руды, нуждаются не только в контроле уровня загрязнения почв по основным извлекаемым элементам-поллютантам, но и сопутствующим, таким как Se и Te.

Материалы данной работы могут быть использованы для улучшения управления экологической безопасностью региона. В целях недопустимости дальнейшего распространения и накопления Se и Te в депонирующих средах в Соймоновской долине и других аналогичных областях следует пересмотреть технологический процесс хранения и переработки отходов медно-колчеданных месторождений.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Знаменский С. Е., Знаменская Н. А. Классификация золоторудных месторождений Восточного склона Южного Урала // Геологический сборник. — 2009. — № 8. — С. 177—186.

2. *Мурзин В. В., Варламов Д. А., Ронкин Ю. Л., Шанина С. Н.* Происхождение золотоносных родингитов Карабашского массива альпинотипных гипербазитов на Южном Урале // Геология рудных месторождений. — 2013. — Т. 55. — № 4. — С. 320 – 341.

3. Абатурова И. В., Петрова И. Г., Болтыров В. Б., Клокова Ю. В. Особенности проведения экологической оценки на месторождениях рудного золота в Иркутской области и Якутии // Горный информационно-аналитический бюллетень. — 2022. — № 11-1. — С. 5 — 17. DOI: 10.25018/0236_1493_2022_111_0_5.

4. Куликова А. А., Сергеева Ю. А., Овчинникова Т. И., Хабарова Е. И. Формирование шахтных вод и анализ способов их очистки // Горный информационно-аналитический бюллетень. — 2020. — № 7. — С. 135 — 145. DOI: 10.25018/0236-1493-2020-7-0-135-145.

5. 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.

6. Annandale J. M., Gorbunova T. L., Gudkova N. K. Process water and waste management in open cast quarries and the possibility of fine sediments rational use // Устойчивое развитие горных территорий. 2021. — vol. 13. — № 1. — С. 7—15. DOI: 10.21177/1998-4502-2021-13-1-7-15.

7. 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.

8. 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.

9. Пинский Д. Л., Минкина Т. М., Бауэр Т. В., Невидомская Д. Г., Шуваева В. А., Манджиева С. С., Цицуашвили В. С., Бурачевская М. В., Чаплыгин В. А., Барахов А. В., Велигжанин А. А., Светогоров Р. Д., Храмов Е. В., Иовчева А. Д. Идентификация соединений тяжелых металлов в техногенно преобразованных почвах методами последовательного фракционирования, XAFS-спектроскопии и XRD порошковой дифракции // Почвоведение. — 2022. — № 5. — С. 600 — 614. DOI: 10.31857/S0032180X22050070.

10. Болтыров В. Б., Стороженко Л. А., Сапсай М. А. Накопленный экологический вред территорий размещения горнопромышленных отходов прошлых лет // Горный информационно-аналитический бюллетень. — 2021. — № 5-2. — С. 202 — 217. DOI: 10.25018/0236_1493 2021 52 0 202.

11. 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.

12. 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.

13. McLinden C., Fioletov V., Shephard M., Krotkov N., Can Li, Martin R. V., Moran M. D., Joiner J. Space-based detection of missing sulfur dioxide sources of global air pollution // Nature Geoscience. 2016, vol. 9, pp. 496 – 500. DOI: 10.1038/ngeo2724.

14. *Khamkhash V., Srivastava T., Ghosh G., Akdogan R., Ganguli S.* Aggarwal Mining-related selenium contamination in Alaska, and the and the State of Current Knowledge // Minerals. 2017, vol. 7, no. 46, pp. 1 – 13. DOI: 10.3390/min7030046.

15. Schirmer T., Koschinsky A., Bau M. The ratio of tellurium and selenium in geological material as a possible paleo-redox proxy // Chemical Geology. 2014, vol. 376, pp. 44 – 51. DOI: 10.1016/j.chemgeo.2014.03.005.

16. *Keith M., Smith D. J., Jenkin G. R. T., Holwell D. A., Dye M. D.* A review of Te and Se systematics in hydrothermal pyrite from precious metal deposits: insights into ore-forming processes // Ore Geology Reviews. 2017, vol. 96, pp. 269–282. DOI: 10.1016/j.oregeo-rev.2017.07.023.

17. Deditius A. P., Reich M., Kesler S. E., Utsunomiya S., Chryssoulis S. L., Walshe J., Ewing R. C. The coupled geochemistry of Au and As in pyrite from hydrothermal ore deposits // Geochimica et Cosmochimica Acta. 2014, vol. 140, pp. 644–670. DOI: 10.1016/j. gca.2014.05.045.

18. Tanner D., Henley R. W., Mavrogenes J. A., Holden P. Sulfur isotope and trace element systematics of zoned pyrite crystals from the El Indio Au-Cu-Ag deposit // Contributions to Mineralogy and Petrology. 2016, vol. 171, no. 4, pp. 1 - 17. DOI: 10.1007/s00410-016-1248-6.

19. Карпов А. М., Тальнов Е. С. Микроэлементы пиритов — индикаторы условий формирования минералов // Известия Саратовского университета. — 2004. — Т. 4. — № 1-2. — С. 60—63.

20. *Онуфриенок В. В.* Анализ позиций примесных атомов в структуре пирита // Современные наукоемкие технологии. — 2013. — № 6. — С. 186—192.

21. Hechler J., Udachin V., Aminov P., Beckett P., Spiers G. Efflorescent sulfate minerals of the Karabash mining/smelting area, Ural Mountains, Russia // Mineralogy. 2018, vol. 4, no. 4, pp. 96-101.

22. *Izquierdo M., Querol X.* Leaching behavior of elements from coal combustion fly ash: An overview // International Journal of Coal Geology. 2012, vol. 94, pp. 54–66. DOI: 10.1016/J.COAL.2011.10.006.

23. 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.

24. 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. — 535 — 543. DOI: 10.21177/1998-4502-2021-13-4-535-543.

25. Wen H., Carignan J. Reviews on atmospheric selenium: Emissions, speciation, and fate // Atmospheric Environment. 2007, vol. 41, pp. 7151 – 7165. DOI: 10.1016/j.atmosenv.2007.07.035.

26. 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.

27. Аминов П. Г., Филиппова К. А., Удачин В. Н. Накопление тяжелых металлов корой Pinussylvestris в градиентном поле рассеяния элементов (Карабашская геотехническая система, Южный Урал) / Наука ЮУрГУ: Материалы 69-й научной конференции. — Челябинск: Издательский центр ЮУрГУ, 2017. — С. 62 — 70.

28. Минкина Т. М., Невидомская В. А., Шуваева В. А., Линник В. Г., Цицуашвили В. С. Рентгеноспектральные исследования Zn в почвах Южного Урала при горнопромышленном техногенезе / Горные экосистемы и их компоненты: Материалы VIII Всероссийской конференции с международным участием, посвященной Году науки и технологий в Российской Федерации. — Нальчик: ИЭГТ РАН, 2021. — С. 17.

29. Шабанов М. В., Маричев М. С. Геохимические аномалии тяжелых металлов в почвах природных и антропогенных ландшафтов (на примере Красноуральского промузла) // Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов. — 2022. — Т. 333. — № 6. — С. 230 — 239. DOI 10.18799/24131830/2022/6/3545.

30. *Bosikov I. I., Klyuev R. V., Dmitrak Yu. V.* Analysis of hazardous processes in the natural industrial system / Advances in Raw Material Industries for Sustainable Development Goals. 2021, pp. 422 – 429. DOI: 10.1201/9781003164395-53.

31. *IUSS Working* Group WRB. 2015. World reference base for soil resources 2014, update 2015. International soil classification system for naming soils and creating legends for soil maps. Word Soil Resources Report. Rome, 2014. No. 106. Food and Agriculture Organization. 181 p.

32. Шишов Л. Л., Тонконогов В. Д., Лебедева И. И., Герасимова М. И. Классификация и диагностика почв России. — Смоленск: Ойкумена, 2004. — 341 с.

33. *Алексеенко В. А.* Геохимия ландшафта и окружающая среда. — М.: Недра, 1990. — 142 с.

34. *Hu Z., Gao S.* Upper crustal abundances of trace elements: A revision and update // Chemical Geology. 2008, vol. 253, pp. 205 – 221. DOI: 10.1016/j.chemgeo.2008.05.010.

35. *Ермаков В. В.* Субрегионы и биогеохимические провинции СССР с различным содержанием селена // Труды биогеохимической лаборатории. — 1978. — Т. 15. — С. 54—57.

36. *Конова Н. И.* К вопросу о биогеохимии селена в различных геохимических условиях // Микроэлементы. — 1993. — № 33. — С. 43—48.

37. Водяницкий Ю. Н. Состояние и поведение природных и техногенных форм As, Sb, Se, Te в рудных отвалах и загрязненных почвах (обзор литературы) // Почвоведение. — 2010. — № 1. — С. 37 — 46.

38. Ryser A. L., Strawn D. G., Marcus M. A., Fakra S., Johnson-Maynard J. L., Moller G. Microscopically focused synchrotron X-ray investigation of selenium speciation in soils developing on reclaimed mine lands // Environmental Science & Technology. 2006, vol. 40, no. 2, pp. 462 – 467. DOI: 10.1021/es051674i.

39. Пономарева Н. А., Степанова И. П., Конева И. В. К вопросу о токсическом действии теллура на животный организм // Омский научный вестник. Естественные науки. — 2006. — № 10 (50). — С. 85 – 88.

40. *Qin H-B., Takeichi Y., Nitani H., Terada Y., Takahashi Y.* Tellurium distribution and speciation in contaminated soils from abandoned mine tailings: Comparison with Selenium // Chemistry, Medicine. Environmental Science and Technology. 2017, vol. 51, no. 11, pp. 6027 – 6035. DOI: 10.1021/acs.est.7b00955.

41. Saha U., Fayiga A., Sonon L. Selenium in the soil-plant environment: A review // International Journal of Applied Agricultural Sciences. 2017, vol. 3, no. 1, pp. 1–18. DOI: 10.11648/j.ijaas.20170301.1.

42. *Chen Y. W., Li L., D'Ulivo A., Belzile N.* Extraction and determination of elemental selenium in sediments – A comparative study // Analytica Chimica Acta. 2006, vol. 577, no. 1, pp. 126–133. DOI: 10.1016/j.aca.2006.06.020.

43. Шабанов М. В. Сера в геохимически сопряженных ландшафтах Соймоновской долины Челябинской области // Известия УГГУ. — 2021. — № 1 (61). — С. 118—126. DOI: 10.21440/2307-2091-2021-1-118-126.

44. Dhillon K. S., Dhillon S. K. Distribution and management of seleniferous soils // Advances in Agronomy. 2003, vol. 79. pp. 119–184. DOI: 10.1016/S0065-2113(02)79003-2.

REFERENCES

1. Znamensky S. E., Znamenskaya N. A. Classification of gold deposits of the Eastern slope of the Southern Urals. *Geologicheskiy sbornik*. 2009, no. 8, pp. 177 – 186. [In Russ].

2. Murzin V. V., Varlamov D. A., Ronkin Yu. L., Shanina S. N. Origin of gold-bearing rodingites of the Karabash massif of Alpinotypic hyperbasites in the Southern Urals. *Geologiya Rudnykh Mestorozhdenij.* 2013, vol. 55, no. 4, pp. 320 – 341. [In Russ].

3. Abaturova I. V., Petrova I. G., Boltyrov V. B., Klokova Ju. V. Features of environmental assessment at ore gold deposits in the Irkutsk region and Yakutia. *MIAB. Mining Inf. Anal. Bull.* 2022, no. 11-1, pp. 5 – 17. [In Russ]. DOI: 10.25018/0236_1493_2022_111_0_5.

4. Kulikova A. A., Sergeeva Yu. A., Ovchinnikova T. I., Khabarova E. I. Formation of mine water composition and analysis of treatment methods. *MIAB. Mining Inf. Anal. Bull.* 2020, no. 7, pp. 135–145. [In Russ]. DOI: 10.25018/0236-1493-2020-7-0-135-145.

5. 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: 10.25 018/0236_1493_2021_111_0_98.

6. Annandale J. M., Gorbunova T. L., Gudkova N. K. Process water and waste management in open cast quarries and the possibility of fine sediments rational use. *Sustainable Development of Mountain Territories*. 2021, vol. 13, no. 1, pp. 7–15. DOI: 10.21177/1998-4502-2021-13-17-15.

7. 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.

8. 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.

9. Pinsky D. L., Minkina T. M., Bauer T. V., Nevidomskaya D. G., Shuvaeva V. A., Manjieva S. S., Tsitsuashvili V. S., Burachevskaya M. V., Chaplygin V. A., Barakhov A. V., Veligzhanin A. A., Svetogorov R. D., Khramov E. V., Iovcheva A. D. Identification of heavy metal compounds in technogenically transformed soils by methods of sequential fractionation, XAFSspectroscopy and XRD powder diffraction. *Eurasian Soil Science*. 2022, no. 5, pp. 600–614. [In Russ]. DOI: 10.31857/S0032180X22050070.

10. Boltyrov 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.

11. 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.

12. 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.

13. McLinden C., Fioletov V., Shephard M., Krotkov N., Can Li, Martin R. V., Moran M. D., Joiner J. Space-based detection of missing sulfur dioxide sources of global air pollution. *Nature Geoscience*. 2016, vol. 9, pp. 496 – 500. DOI: 10.1038/ngeo2724.

14. Khamkhash V., Srivastava T., Ghosh G., Akdogan R., Ganguli S. Aggarwal Mining-related selenium contamination in Alaska, and the and the State of Current Knowledge. *Minerals.* 2017, vol. 7, no. 46, pp. 1 – 13. DOI: 10.3390/min7030046.

15. Schirmer T., Koschinsky A., Bau M. The ratio of tellurium and selenium in geological material as a possible paleo-redox proxy. *Chemical Geology*. 2014, vol. 376, pp. 44–51. DOI: 10.1016/j.chemgeo.2014.03.005.

16. Keith M., Smith D. J., Jenkin G. R. T., Holwell D. A., Dye M. D. A review of Te and Se systematics in hydrothermal pyrite from precious metal deposits: insights into ore-forming processes. *Ore Geology Reviews*. 2017, vol. 96, pp. 269–282. DOI: 10.1016/j.oregeorev.2017.07.023.

17. Deditius A. P., Reich M., Kesler S. E., Utsunomiya S., Chryssoulis S. L., Walshe J., Ewing R. C. The coupled geochemistry of Au and As in pyrite from hydrothermal ore deposits. *Geochimica et Cosmochimica Acta*. 2014, vol. 140, pp. 644 – 670. DOI: 10.1016/j.gca.2014.05.045.

18. Tanner D., Henley R. W., Mavrogenes J. A., Holden P. Sulfur isotope and trace element systematics of zoned pyrite crystals from the El Indio Au-Cu-Ag deposit. *Contributions to Mineralogy and Petrology*. 2016, vol. 171, no. 4, pp. 1 - 17. DOI: 10.1007/s00410-016-1248-6.

19. Karpov A. M., Talnov E. S. Trace elements in pyrite – indicators of mineral formation conditions. *Izvestia of Saratov University*. 2004, vol. 4, no. 1-2, pp. 60–63. [In Russ].

20. Onufrienok V. V. Analysis of the positions of impurity atoms in the structure of pyrite. *Modern high technologies.* 2013, no. 6, pp. 186–192. [In Russ].

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

22. Izquierdo M., Querol X. Leaching behavior of elements from coal combustion fly ash: An overview. *International Journal of Coal Geology*. 2012, vol. 94, pp. 54–66. DOI: 10.1016/J. COAL.2011.10.006.

23. 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.

24. 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.

25. Wen H., Carignan J. Reviews on atmospheric selenium: Emissions, speciation, and fate. *Atmospheric Environment*. 2007, vol. 41, pp. 7151 – 7165. DOI:10.1016/j.atmosenv.2007.07.035.

26. 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.

27. Aminov P. G., Filippova K. A., Udachin V. N. Accumulation of heavy metals by Pinussylvestris bark in the gradient field of element dispersion (Karabash geotechnical system, Southern Urals). *Nauka YUUrGU: Materialy 69-y nauchnoy konferentsii* [Science South Ural State University: Materials of the 69th scientific conference], Chelyabinsk, Izdatel'skiy tsentr YUUrGU, 2017, pp. 62–70. [In Russ].

28. Minkina T. M., Nevidomskaya V. A., Shuvaeva V. A., Linnik V. G., Tsitsuashvili V. S. X-ray studies of Zn in soils of the Southern Urals during mining technogenesis. *Gornye ekosistemy i ikh komponenty: Materialy VIII Vserossiyskoy konferentsii s mezhdunarodnym uchastiem*,

posvyashchennoy Godu nauki i tekhnologiy v Rossiyskoy Federatsii [Mountain ecosystems and their components: Proceedings of the VIII All-Russian Conference with international participation, dedicated to the Year of Science and Technology in the Russian Federation], Nal'chik, IEGT RAN, 2021, pp. 17. [In Russ].

29. Shabanov M. V., Marichev M. S. Geochemical anomalies of heavy metals in soils of natural and anthropogenic landscapes (by the example of Krasnouralsky industrial area). *Bulletin of the Tomsk Polytechnic University. Geo Assets Engineering.* 2022, vol. 333, no. 6, pp. 230 – 239. [In Russ]. DOI 10.18799/24131830/2022/6/3545.

30. Bosikov I. I., Klyuev R. V., Dmitrak Yu. V. Analysis of hazardous processes in the natural industrial system. *Advances in Raw Material Industries for Sustainable Development Goals.* 2021, pp. 422 – 429. DOI: 10.1201/9781003164395-53.

31. IUSS Working Group WRB. 2015. World reference base for soil resources 2014, update 2015. International soil classification system for naming soils and creating legends for soil maps. Word Soil Resources Report. Rome, 2014. N 106. Food and Agriculture Organization. 181 p.

32. Shishov L. L., Tonkonogov V. D., Lebedeva I. I., Gerasimova M. I. *Klassifikatsiya i diagnostika pochv Rossii* [Classification and diagnostics of soils in Russia], Smolensk, Oykumena, 2004, 341 p.

33. Alekseenko V. A. *Geokhimiya landshafta i okruzhayushchaya sreda* [Geochemistry of landscape and environment], Moscow, Nedra, 1990, 142 p.

34. Hu Z., Gao S. Upper crustal abundances of trace elements: A revision and update. *Chemical Geology*. 2008, vol. 253, pp. 205 – 221. DOI: 10.1016/j.chemgeo.2008.05.010.

35. Ermakov V. V. Subregions and biogeochemical provinces of the USSR with different content of selenium. *Trudy biogeokhimicheskoy laboratorii*. 1978, vol. 15, pp. 54 – 57. [In Russ].

36. Konova N. I. To a question on biogeochemistry of selenium in various geochemical conditions. *Microelements*. 1993, no. 33, pp. 43 – 48. [In Russ].

37. Vodyanitsky Y. N. State and behavior of natural and anthropogenic forms of As, Sb, Se, Te in ore dumps and contaminated soils (literature review). *Eurasian Soil Science*. 2010, no. 1, pp. 37–46. [In Russ].

38. Ryser A. L., Strawn D. G., Marcus M. A., Fakra S., Johnson-Maynard J. L., Moller G. Microscopically focused synchrotron X-ray investigation of selenium speciation in soils developing on reclaimed mine lands. *Environmental Science & Technology*. 2006, vol. 40, no. 2, pp. 462 – 467. DOI: 10.1021/es051674i.

39. Ponomareva N. A., Stepanova I. P., Koneva I. V. On the toxic effects of tellurium on the animal organism. *Omsk Scientific Bulletin. Natural Sciences.* 2006, no. 10 (50), pp. 85 – 88. [In Russ].

40. Qin H-B., Takeichi Y., Nitani H., Terada Y., Takahashi Y. Tellurium distribution and speciation in contaminated soils from abandoned mine tailings: Comparison with Selenium. *Chemistry, Medicine. Environmental Science and Technology*. 2017, vol. 51, no. 11, pp. 6027 – 6035. DOI: 10.1021/acs.est.7b00955.

41. Saha U., Fayiga A., Sonon L. Selenium in the soil-plant environment: A review. *International Journal of Applied Agricultural Sciences*. 2017, vol. 3, no. 1, pp. 1–18. DOI: 10.11648/j. ijaas.20170301.1.

42. Chen Y. W., Li L., D'Ulivo A., Belzile N. Extraction and determination of elemental selenium in sediments – A comparative study. *Analytica Chimica Acta*. 2006, vol. 577, no. 1, pp. 126–133. DOI: 10.1016/j.aca.2006.06.020.

43. Shabanov M. V. Sulfur in geochemically conjugated landscapes Soimonovskaya valley Chelyabinsk region. *News of the Ural State Mining University*. 2021, no. 1 (61), pp. 118–126. [In Russ]. DOI: 10.21440/2307-2091-2021-1-118-126.

44. Dhillon K. S., Dhillon S. K. Distribution and management of seleniferous soils. *Advances in Agronomy*. 2003, vol. 79. pp. 119–184. DOI: 10.1016/S0065-2113(02)79003-2.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

Шабанов Михаил Викторович¹ — канд. с.-х. наук, доцент, e-mail: geohim.spb@gmail.com, Scopus Author ID: 35171489500, ORCID ID: 0000-0003-4725-3673. Маричев Максим Сергеевич¹ — канд. биол. наук. зав. лабораторией. e-mail: m.s.marichev@vandex.ru. Scopus Author ID: 57216298057, ORCID ID: 0000-0003-0429-2234. Минкина Татьяна Михайловна² — д-р биол. наук, профессор, зав. кафедрой, e-mail: minkina@sfedu.ru, Scopus Author ID: 15063165400. ORCID ID: 0000-0003-3022-0883, Невидомская Дина Георгиевна² — канд. биол. наук, ведуший научный сотрудник. e-mail: dnevidomskaya@mail.ru, Scopus Author ID: 6505510923. ORCID ID: 0000-0002-0138-4443. Шуваева Виктория Анатольевна² — д-р физ.-мат. наук, ведущий научный сотрудник, e-mail: v_shuvaeva@mail.ru, Scopus Author ID: 7004352543, ¹ Санкт-Петербургский государственный аграрный университет, ² Южный федеральный университет. **Для контактов:** Маричев М.С., e-mail: m.s.marichev@vandex.ru.

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

M.V. Shabanov¹, Cand. Sci. (Agric.), Assistant Professor. e-mail: geohim.spb@gmail.com. Scopus Author ID: 35171489500, ORCID ID: 0000-0003-4725-3673. M.S. Marichev¹, 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. Minkina², Dr. Sci. (Biol.), Professor, Head of Chair, e-mail: minkina@sfedu.ru, Scopus Author ID: 15063165400, ORCID ID: 0000-0003-3022-0883, D.G. Nevidomskaya², Cand. Sci. (Biol.), Leading Researcher, e-mail: dnevidomskava@mail.ru, Scopus Author ID: 6505510923. ORCID ID: 0000-0002-0138-4443, V.A. Shuvaeva², Dr. Sci. (Phys. Mathem.), Leading Researcher, e-mail: v shuvaeva@mail.ru, Scopus Author ID: 7004352543. ¹ Saint-Petersburg State Agrarian University, Saint-Petersburg, Pushkin, Russia, ² Southern Federal University, 344006, Rostov-on-Don, Russia. **Corresponding author:** M.S. Marichev, e-mail: m.s.marichev@yandex.ru.

Получена редакцией 12.01.2023; получена после рецензии 15.03.2023; принята к печати 10.04.2023. Received by the editors 12.01.2023; received after the review 15.03.2023; accepted for printing 10.04.2023.