

ГОРНОПРОМЫШЛЕННАЯ И НЕФТЕГАЗОПРОМЫСЛОВАЯ ГЕОЛОГИЯ,
ГЕОФИЗИКА, МАРКШЕЙДЕРСКОЕ ДЕЛО И ГЕОМЕТРИЯ НЕДР

Краткое сообщение

УДК 504.5

EDN: PYLLUR

DOI: 10.21285/2686-9993-2023-46-4-432-444

**Первые результаты применения методов обогащения
полезных ископаемых для извлечения металлов
из техногенно загрязненных почвогрунтов с существенным
содержанием органического вещества****В.В. Трусова^{a,✉}, О.Л. Качор^b, А.С. Алексеев^c, А.В. Паршин^d**^{a,b,d}*Иркутский национальный исследовательский технический университет, г. Иркутск, Россия*^{a,c,d}*Институт геохимии им. А.П. Виноградова СО РАН, г. Иркутск, Россия*^c*Иркутский научно-исследовательский институт благородных и редких металлов и алмазов,
г. Иркутск, Россия*

Резюме. Цель данной работы заключалась в представлении результатов исследования по применению обогащательных методов в отношении опасных отходов объекта накопленного вреда – промплощадки бывшего завода по производству аккумуляторов ОАО «Востсибэлемент», расположенного в г. Свирске Иркутской области. В рамках ранее проведенных исследований было установлено, что почвогрунт на территории промплощадки содержит значительные содержания тяжелых металлов и мышьяка, превышающие нормативные показатели в сотни и тысячи раз, что обуславливает его высокий класс опасности – II и III. Для снижения класса опасности и уменьшения объема опасных отходов предложено использовать рекуперативный подход, заключающийся в извлечении некоторых металлов и мышьяка с дальнейшим их вовлечением в хозяйственный оборот. Для гравитационного извлечения металлов и мышьяка были использованы винтовой сепаратор, концентрационный стол и центробежный концентратор. Наилучшие результаты были получены с использованием концентрационного стола: обогащение на концентрационном столе позволило увеличить содержание свинца в концентрате в 22 раза по сравнению с содержанием в исходной пробе, мышьяка – в 7,7 раза, железа – в 16,7 раза. Магнитное обогащение промпродукта концентрационного стола позволило получить концентрат с высоким содержанием и извлечением железа, меди и цинка. Несмотря на то что в отличие от руд отход в виде почвогрунта включает значительное количество органического вещества, показана возможность успешного извлечения металлов и значительное снижение их концентраций в почвогрунте. На основе полученных данных сформированы предложения по дальнейшей схеме переработки отходов.

Ключевые слова: рекультивация, техногенные отходы, методы обогащения руд, техногенное месторождение, объект накопленного вреда, загрязнение, свинец

Для цитирования: Трусова В.В., Качор О.Л., Алексеев А.С., Паршин А.В. Первые результаты применения методов обогащения полезных ископаемых для извлечения металлов из техногенно загрязненных почвогрунтов с существенным содержанием органического вещества // Науки о Земле и недропользование. 2023. Т. 46. № 4. С. 432–444. <https://doi.org/10.21285/2686-9993-2023-46-4-432-444>. EDN: PYLLUR.



APPLIED MINING AND PETROLEUM FIELD GEOLOGY,
GEOPHYSICS, MINE SURVEYING AND SUBSOIL GEOMETRY

Brief report

**First results of using mineral concentration methods
for metal recover from technogenically contaminated soils
with significant organic concentrations**

Valentina V. Trusova^{a✉}, Olga L. Kachor^b, Ayaal S. Alekseev^c, Alexander V. Parshin^d

^{a,b,d}Irkutsk National Research Technical University, Irkutsk, Russia

^{a,c,d}A.P. Vinogradov Institute of Geochemistry SB RAS, Irkutsk, Russia

^cIrkutsk Research Institute of Precious and Rare Metals and Diamonds, Irkutsk, Russia

Abstract. The purpose of the article is to present the research results on the application of concentration methods to hazardous waste from the industrial site of the former Vostsibelement battery plant located in the town of Svirsk, Irkutsk region (Russia), which is the facility of accumulated environmental damage. The previous studies have identified significant contents of heavy metals and arsenic that exceed standard values by hundreds and thousands of times in the industrial site soils. This fact determines soil high hazard class – II and III. To reduce the hazard class and decrease the volume of hazardous waste it is proposed to use a recuperative approach, that means to recover some metals and arsenic in order to return them in economic circulation. A spiral concentrator, a shaking table and a centrifugal concentrator were used for gravity concentration of metals and arsenic. The best results were obtained using a shaking table. The latter made it possible to increase the lead content in the concentrate by 22 times as compared to the content in the original sample, arsenic content by 7.7 times, and iron content by 16.7 times. Magnetic concentration of the shaking table middlings made it possible to obtain a concentrate with a high content and recovery of iron, copper and zinc. Despite the fact that the soil waste contains a significant amount of organic matter unlike the case of ore processing, the possibility of successful metal recover and significant reduction of metal concentrations in soil is shown. The proposals for a further waste-recycling scheme are made on the basis of the data obtained.

Keywords: reclamation, technogenic waste, ore concentration methods, technogenic deposit, object of accumulated harm, contamination, lead

For citation: Trusova V.V., Kachor O.L., Alekseev A.S., Parshin A.V. First results of using mineral concentration methods for metal recover from technogenically contaminated soils with significant organic concentrations. *Nauki o Zemle i nedropol'zovanie = Earth sciences and subsoil use*. 2023;46(4):432-444. (In Russ.). <https://doi.org/10.21285/2686-9993-2023-46-4-432-444>. EDN: PYLLUR.

Введение

В соответствии со ст. 1 Федерального закона от 10 января 2002 г. № 7-ФЗ «Об охране окружающей среды»¹, накопленный вред окружающей среде определяется как ущерб для окружающей среды, возникший в результате прошлой экономической и иной деятельности, обязанности по устранению которой не были выполнены либо были выполнены не в полном объеме. Объекты накопленного вреда окружающей среде занимают значительные площади земель, являются источниками поступления в окружающую среду загрязняющих веществ, что в конечном итоге приводит к загрязнению почв, поверхностных и подземных водных объектов, в том числе источников водоснабжения, и к нарушению

геохимического баланса территорий.

Выявление и оценку объектов накопленного вреда окружающей среде проводят государственные органы власти субъектов Российской Федерации, в некоторых случаях – федеральные органы исполнительной власти. Выявление объекта негативного воздействия на окружающую среду осуществляется посредством инвентаризации и обследования территорий и акваторий, на которых в прошлом осуществлялась экономическая и иная деятельность и (или) расположены хозяйственные объекты капитального строительства и объекты размещения отходов (п. 1 ст. 80.1 закона № 7-ФЗ). Обнаруженные объекты негативного воздействия на окружающую среду вносятся в Государственный реестр

¹ Об охране окружающей среды: федер. закон от 10 января 2002 г. № 7-ФЗ // КонсультантПлюс. Режим доступа: https://www.consultant.ru/document/cons_doc_LAW_34823/?ysclid=lqepmt6dvt305640878 (дата обращения: 24.11.2023).



объектов накопленного вреда окружающей среде после предоставления в региональные министерства информации по первоначальной оценке экологического состояния исследуемой техногенно-нарушенной территории. Эта информация включает в себя уровень и масштаб негативного воздействия на окружающую среду, способность загрязняющих веществ к миграции в другие компоненты природной среды, а также возможность загрязнения водных объектов и возникновения экологических рисков. По состоянию на октябрь 2023 г. в Государственный реестр объектов накопленного вреда окружающей среде входит 502 объекта, 4 из которых находятся на территории Иркутской области².

Еще одним потенциальным объектом для включения в перечень объектов негативного воздействия на окружающую среду является промышленная площадка бывшего завода по производству аккумуляторов ОАО «Востсибэлемент», расположенного в г. Свирске Иркутской области. Работы по масштабной оценке экологического состояния территории данного объекта проводятся в Иркутском национальном исследовательском техническом университете с 2021 г. – с тех пор, как в университет с этим запросом обратилась администрация г. Свирска [1–3].

Завод ОАО «Востсибэлемент» был основан в 1939 г. и просуществовал до 1999 г. С тех пор здания предприятия так и не были демонтированы, промплощадка не рекультивировалась. Бывший завод расположен в пределах жилой зоны по соседству с несколькими садоводствами в 5 м от р. Ангара. Сама промплощадка занимает площадь в 35 га: на ней расположены полуразрушенные цеха, построенные в разное время, отходы производства и загрязненный почвогрунт.

В разное время данным объектом и сопредельными территориями занимались значительное количество исследовательских коллективов из различных организаций [4–7], но, вероятно, в связи с высокой изменчивостью геохимических аномалий на участке, требующей повышенной детальности исследований, крайне высокая опасность объекта не была зафиксирована. Тем не менее по результатам исследований, проведенных в 2021–2022 гг. разными научными коллективами Иркутского

национального исследовательского технического университета, рассматриваемая территория является источником накопленного вреда окружающей среде. В ходе наших исследований было установлено, что в техногенном грунте промплощадки бывшего завода «Востсибэлемент» концентрации загрязняющих веществ превышают нормативные и фоновые значения по свинцу (предельно допустимая концентрация – 32 мг/кг) в отдельных пробах в несколько тысяч раз, цинку (ориентировочно допустимая концентрация – 55 мг/кг), меди (ориентировочно допустимая концентрация – 33 мг/кг), а также по мышьяку (предельно допустимая концентрация – 2 мг/кг) в сотни раз, что позволяет рассматривать такой почвогрунт как отход производства. По результатам биотестирования было установлено, что на отдельных участках промплощадки присутствует настолько загрязненный почвогрунт, что его можно отнести ко II и III классу опасности [1]. Также зафиксировано, что загрязняющие вещества проникли вглубь почвенного профиля и концентрируются в плотном суглинке с глубины от 1,5 м. Токсиканты с промплощадки наблюдаются в объектах окружающей среды и за пределами бывшего завода. Так, данные о состоянии донных отложений р. Ангара свидетельствуют о значительном накоплении в них загрязняющих веществ ниже по течению реки от промплощадки. Данные снегогеохимической съемки по г. Свирску наглядно представляют масштабные ореолы негативного влияния бывшего аккумуляторного завода на состояние атмосферного воздуха в населенном пункте [2]. Кроме того, в последние годы на неогороженной территории промплощадки все чаще проводятся незаконные работы по разбору зданий для выемки коммуникаций с целью их дальнейшей сдачи в качестве вторсырья. Такие действия приводят к дополнительному вторичному загрязнению за счет возвращения адсорбированных на глиняном затворе (ниже 1,5 м) токсикантов снова на дневную поверхность, а также из поверхностного слоя почвогрунта и строительных конструкций в воздушную среду.

В связи со всем вышесказанным разработка технологии для скорейшей рекультивации территории промплощадки бывшего аккумуляторного завода «Востсибэлемент» является актуальной задачей. Гипотеза проведенного

² Государственный реестр объектов накопленного вреда окружающей среде по состоянию на 24 октября 2023 г. Режим доступа: <https://www.mnr.gov.ru/upload/medialibrary/3c0/%D0%93%D0%A0%D0%9E%D0%9D%D0%92%D0%9E%D0%A1%20%D0%BD%D0%B0%2015.07.2022.XLSX?ysclid=lc4te08ujr351819878> (дата обращения: 24.11.2023).



исследования заключается в доказательстве или опровержении возможности успешного применения методов обогащения руд для объекта с достаточно высоким содержанием органического вещества, который представляет собой почвогрунт промплощадки.

Материалы и методы исследования

Осенью 2022 и 2023 гг. на некоторых участках промплощадки бывшего завода «Востсибэлемент» со значимыми (но не максимальными) концентрациями загрязняющих веществ были отобраны семь проб почвогрунта, которые по имеющимся данным должны были отражать возможные средние (не максимальные) концентрации загрязняющих веществ в почвогрунте объекта (рис. 1).



Рис. 1. Местоположение площадки и точки отбора проб:

1 – точки; 2 – граница

Fig. 1. Site location and sampling points:

1 – points; 2 – boundary

Эти участки представляют наибольший интерес для применения на них рекуперативных технологий, так как почвогрунт с высоким содержанием загрязняющих веществ является как основой экологической проблемы, так и наиболее показательным объектом для отработки способов извлечения ценных компонентов.

Отбор проб для определения концентрации металлов в почвогрунте проводился на площадке бывшего завода в соответствии с ГОСТ 17.4.3.01-2017³ методом точечной пробы послойно с глубин 0–5 и 5–20 см, вес каждой пробы составлял около 1 кг. Для изучения возможности извлечения металлов из почвогрунта в этих же точках были отобраны пробы массой около 10 кг каждая.

Количественный химический анализ исходных проб и продуктов обогащения проводился по ГОСТ 33850-2016⁴. Химический состав определяется методом рентгенофлуоресцентной спектromетрии с использованием портативного рентгенофлуоресцентного анализатора SciAps серии X200 в режиме «Почва». Возможность применения портативного анализатора для оперативной и точной оценки состояния почв была подтверждена в ранее выполненных исследованиях [8].

Минералогические исследования отобранных проб проводили с использованием сканирующего электронного микроскопа Tescan MIRA 3 LMN. Препараты для анализа изготавливали по общепринятым методикам в виде блоков из эпоксидной смолы (эпоксидных «шашек») с нанесенными на них минеральными зернами.

Гравитационное обогащение проводили на концентрационном столе СКОШ-0,5 и винтовом шлюзе (ШВ-250). Подготовка проб к технологическим исследованиям осуществлялась по классической методике, включающей последовательное дробление проб в замкнутом цикле с грохочением до крупности -0,315 мм при тщательном перемешивании.

Разделение проб на магнитную и немагнитную фракции проводили на электромагнитном сепараторе 120Т-СЭМ с силой тока 1 А.

³ ГОСТ 17.4.3.01-2017. Почвы. Общие требования к отбору проб // Консорциум «Кодекс». Режим доступа: <https://docs.cntd.ru/document/1200159508?ysclid=lqeqv1jzud43703754> (дата обращения: 24.11.2023).

⁴ ГОСТ 33850-2016. Почвы. Определение химического состава методом рентгенофлуоресцентной спектromетрии // Консорциум «Кодекс». Режим доступа: <https://docs.cntd.ru/document/1200140375> (дата обращения: 24.11.2023).



Результаты исследования и их обсуждение

В первую очередь для установления содержания наиболее значимых металлов, которые предполагается извлечь из почвогрунта промплощадки, был произведен количественный химический анализ отобранных проб. Результаты анализа представлены в табл. 1.

Как видно из табл. 1, во всех пробах отмечено существенное превышение существующих нормативов по всем или некоторым из приведенных элементов. Концентрации наиболее значимы в пробе 1, однако и в ней в сопоставлении с максимальными обнаруженными концентрациями [1] выявленные содержания относительно невысоки. Дополнительно следует отметить, что наряду с металлами, являющимися предметом данной работы, важнейшим поллютантом на промплощадке является мышьяк. По имеющимся данным он в основном находится в водорастворимой форме и является фактором, который не может быть проигнорирован при разработке схемы обогащения отходов.

Исследование проб на электронном микроскопе (рис. 2) показало, что свинец в пробах находится в основном в форме оксидов и карбонатов (платтнерит PbO_2 и церуссит $PbCO_3$). Железо присутствует в пробах в виде сульфидных (пирит) и окисленных соединений: магнетит, сидерит, гетит и другие оксиды. Также в пробах отмечается присутствие следующих минералов: каолин, доломит, биотит,

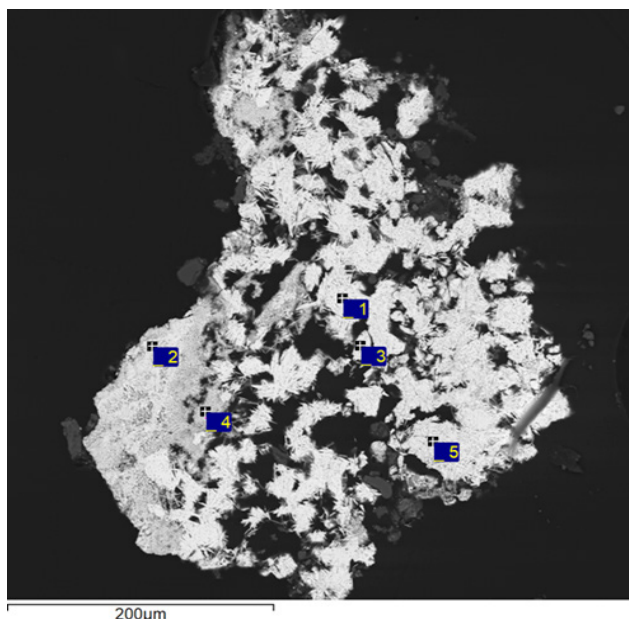


Рис. 2. Электронное изображение пробы 1, -1+0,5 мм:
1, 3, 5 – платтнерит, 2, 4 – церуссит

Fig. 2. Electronic image of the sample 1, -1+0.5 mm:
1, 3, 5 – plattnerite, 2, 4 – cerussite

кальцит, плагиоклаз, кварц, полевые шпаты, гранат, амфиболы, пироксены, хлориты, мусковит и другие.

В настоящее время для переработки свинецсодержащих отходов зачастую применяются пирометаллургические, гидрометаллургические и электрохимические методы⁵ [9]. Тем не менее сложный морфологический состав исследуемых отходов и примеси токсичных летучих элементов не позволяют экологично применять вышеупомянутые методы.

Таблица 1. Содержания преобладающих металлов по результатам количественного химического анализа семи проб почвогрунта промплощадки бывшего завода «Востсибэлемент»
Table 1. Contents of predominant metals according to the results of quantitative chemical analysis of seven soil samples at the former Vostsibelement plant industrial site

Шифр пробы	Концентрация, мг/кг			
	Pb	Fe	Zn	Cu
1 п	19250,37	37135,31	9794,44	258,32
2 п	2849,53	21899,36	223,49	213,62
3 п	914,29	13580,77	40,18	94,96
4 п	2045,43	7660,86	47,84	9,25
5 п	2042,59	14256,09	23,85	29,04
6 п	317,12	35617,31	179,49	49,37
7 п	7402,08	42470,97	597,62	115,2

⁵ Карелов С.В. Научно-технический отчет о выполнении 5 этапа Государственного контракта № 16.740.11.0522 от 16 мая 2011 г. и Дополнению от 15 марта 2013 г. № 1. Екатеринбург, 2013. 125 с. Режим доступа: https://elar.urfu.ru/bitstream/10995/21955/1/otchet_GK_16.740.11.0522_Karelov_S.V..pdf (дата обращения: 24.11.2023).



Так как преобладающими минеральными формами свинца в пробах являются минералы, относящиеся к тяжелым (плотность платнерита – 9,4–9,44 г/см³, церуссита – 6,53–6,57 г/см³), в работе использован гравитационный метод обогащения для извлечения свинца из проб, отобранных на промплощадке. Гравитационные методы обогащения занимают ведущее место (наряду с флотационными и магнитными) среди других методов обогащения, являются экономичными, экологически безопасными, имеют широкий диапазон крупности разделяемых минеральных частиц. Гравитационные методы обогащения используются при обогащении углей и сланцев, золото- и платиносодержащих руд, оловянных, окисленных железных и марганцевых руд, хромовых, вольфрамитовых руд и руд редких металлов, строительных материалов и некоторых других видов сырья [10–13]. Также гравитационные методы обогащения широко используются при переработке лежалых хвостов обогатительных фабрик и отходов производства [14–28].

Для обоснования выбора гравитационного аппарата для извлечения металлов были проведены предварительные тестовые исследования с использованием винтового шлюза и концентрационного стола. В табл. 2 приведены результаты, полученные для пробы 4, характеризующейся невысокими содержаниями элементов относительно большинства проб почвогрунта при полном обследовании промплощадки.

Для проведения экспериментов исходная проба была разделена на части и каждая из этих частей была подвергнута дополнительному химическому анализу, в связи с чем концентрации металлов в табл. 1 и 2 незначительно различаются. Так как концентрации некоторых представленных в табл. 2 металлов как в исходной пробе, так и в продуктах обогащения достаточно низкие, то для удобства восприятия они приведены в нестандартной для обогатительных расчетов размерности – мг/кг.

Как видно из табл. 2, результаты тестовых исследований показали, что несмотря на то, что выход концентрата винтового шлюза в несколько раз превышает выход концентрата концентрационного стола, винтовой шлюз не позволяет разделить металлы по продуктам обогащения. Дополнительные эксперименты по обогащению на центробежном концентраторе Knelson KC-MD3 не дали положительного результата и были признаны неэффективными. Поэтому в дальнейшем для извлечения металлов (в первую очередь свинца как одного из приоритетных загрязнителей промплощадки бывшего завода «Востсибэлемент») был использован концентрационный стол.

На концентрационный стол подавалась объединенная проба, полученная смешиванием проб с разных участков в равных пропорциях общей массой 13 кг, для усреднения проб высокозагрязненных площадей промплощадки с целью имитации рабочего технологического процесса. Результаты опыта (рис. 3) приведены в табл. 3.

Таблица 2. Результаты обогащения проб на концентрационном столе и винтовом сепараторе
Table 2. Results of sample concentration on a shaking table and in a spiral concentrator

Продукт обогащения	Выход, %	Pb		Cu		Fe		Zn	
		β, мг/кг	ε, %	β, мг/кг	ε, %	β, мг/кг	ε, %	β, мг/кг	ε, %
Винтовой шлюз									
Концентрат	9,1	2820,6	12,3	–	–	7690,5	10	39,1	10,3
Хвосты	90,9	2016,9	87,7	14,3	100	6920,1	90	33,9	89,7
Исходная проба	100	2089,9	100	13	100	6990,1	100	34,4	100
Концентрационный стол									
Концентрат	0,1	100314,2	3,9	91,4	0,4	117544,8	1,6	171	0,3
Промпродукт	0,4	40563,9	6,6	40,2	0,9	67796,9	4,5	115,4	0,9
Хвосты	99,5	2212,7	89,5	18,1	98,6	5921,6	93,8	51	98,8
Исходная проба	100	2459,9	100	18,2	100	6279,3	100	51,4	100

Примечание. β – содержание элемента в продукте; ε – извлечение элемента в продукт.



Рис. 3. Процесс обогащения на концентрационном столе
Fig. 3. Mineral concentration on the shaking table

Таблица 3. Результаты обогащения объединенной пробы на концентрационном столе СКОШ-0,5
Table 3. Results of combined sample concentration on the SKOSH-0.5 shaking table

Наименование продукта	Выход, %	Pb		Fe		Zn		As	
		β , %	ϵ , %	β , %	ϵ , %	β , %	ϵ , %	β , мг/кг	ϵ , %
Концентрат	1,2	6,6	27,9	40,1	20	0,2	0,8	1153	9,3
Промпродукт	5,8	0,3	7,1	4,5	10,8	0,1	2,4	3	0,1
Хвосты	93	0,2	65	1,8	69,2	0,3	96,7	146	90,6
Исходная руда	100	0,3	100	2,4	100	0,3	100	149,9	100

Примечание. β – содержание элемента в продукте; ϵ – извлечение элемента в продукт.

По полученным результатам видно, что обогащение на концентрационном столе позволило увеличить содержание свинца в концентрате в 22 раза по сравнению с содержанием в исходной пробе, мышьяка – в 7,7 раза, железа – в 16,7 раза; разделения цинка по продуктам обогащения не происходит.

Для извлечения соединений железа, которые в основном относятся к парамагнетикам (сидерит, гетит, пирит) и ферромагнетикам (магнетит), использовался магнитный метод обогащения. Промпродукт концентрационного стола одного из опытов направлялся на сухую магнитную сепарацию, результаты приведены в табл. 4.

Таблица 4. Результаты обогащения проб на магнитном сепараторе 120Т-СЭМ
Table 4. Results of sample concentration using a 120T-SEM magnetic separator

Наименование продукта	Выход, %	Pb		Fe		Cu		Zn	
		β , %	ϵ , %	β , %	ϵ , %	β , %	ϵ , %	β , %	ϵ , %
Концентрат	18	0,2	25,1	61,5	97,6	0,013	73	0,03	68,3
Хвосты	82	0,13	74,9	0,34	2,4	0,001	27	0,003	31,6
Исходная проба	100	0,15	100	11,4	100	0,003	100	0,008	100

Примечание. β – содержание элемента в продукте; ϵ – извлечение элемента в продукт.



Магнитное обогащение позволило получить концентрат с высоким содержанием и извлечением железа, меди и цинка. На данном этапе достигнуто снижение концентрации относительно исходного содержания железа более чем в 30 раз, меди – в 3 раза, цинка – в 2,5 раза.

Следует отметить, что примененные на данном этапе методы не позволили существенно снизить концентрацию свинца. Над методикой извлечения свинца предполагается работать на следующем этапе исследования, поскольку методы пирометаллургии, являющиеся наиболее эффективными для обогащения свинцовых руд, на данном этапе применить не представлялось возможным в связи с очевидными экологическими последствиями от наличия в пробах высоких содержаний мышьяка. В настоящее время разрабатывается способ его извлечения, после чего работы по созданию оптимальной схемы переработки загрязненных почвогрунтов будут продолжены.

Заключение

На данный момент опыты по обогащению загрязненного почвогрунта с заметным содержанием органического вещества позволили добиться извлечения ряда металлов. Совокуп-

ность гравитационного и магнитного методов обогащения показала хорошие результаты для извлечения железа, меди и цинка, вплоть до того, что полученный концентрат можно рассматривать как источник для получения товарных продуктов перечисленных металлов. На данный момент окончательно не решена задача извлечения свинца, связанная с наличием в пробах мышьяка, затрудняющего применение методов пирометаллургии. В настоящее время завершаются эксперименты по наиболее рациональному и экологичному извлечению мышьяка, находящегося преимущественно в водорастворимой форме, что представляет собой задачу, но не научную проблему. После этого исследование по обогащению всех присутствующих в значимых концентрациях металлов станет возможным завершить.

Важно отметить, что даже полученные на данный момент предварительные результаты по достижению уровня товарного продукта для ряда металлов с принципиальным снижением их концентраций в хвостах свидетельствуют в пользу перспектив рекуперативного подхода к ликвидации объектов с полиметаллическим загрязнением, основанного на применении методов обогащения для почвогрунтов со значимым содержанием органического вещества.

Список источников

1. Качор О.Л., Паршин А.В., Трусова В.В. Комплексный подход к геоэкологической оценке объектов накопленного вреда // Теоретическая и прикладная экология. 2022. № 4. С. 65–71. <https://doi.org/10.25750/1995-4301-2022-4-065-071>. EDN: ADEBVY.
2. Качор О.Л., Паршин А.В., Трусова В.В., Курина А.В. Установление масштабов негативного влияния промплощадки бывшего завода «Востсибэлемент» на объекты окружающей среды // Технологии переработки отходов с получением новой продукции: материалы IV Всерос. науч.-практ. конф. (г. Киров, 30 ноября 2022 г.). Киров, 2022. С. 247–250. EDN: ODGNBY.
3. Богданов А.В., Шкрабо А.И., Шатрова А.С. Технологические решения рекультивации промплощадки бывшего аккумуляторного завода «Востсибэлемент» // Науки о Земле и недропользование. 2023. Т. 46. № 1. С. 84–96. <https://doi.org/10.21285/2686-9993-2023-46-1-84-96>. EDN: DZMCEJ.
4. Баенгуев Б.А., Белоголова Г.А., Чупарина Е.В., Просекин С.Н., Долгих П.Г., Пастухов М.В. Распределение содержания свинца и формы его соединений в техногенной почве г. Свирска (Южное Прибайкалье) // Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов. 2022. Т. 333. № 8. С. 205–214. <https://doi.org/10.18799/24131830/2022/8/3670>. EDN: KDNQGI.
5. Хуснидинов Ш.К., Сосницкая Т.Н., Бутырин М.В., Замашиков Р.В. Оценка загрязнения почвенного покрова тяжелыми металлами и мышьяком МО г. Свирск Иркутской области // Вестник Бурятской государственной сельскохозяйственной академии им. В.Р. Филиппова. 2014. № 1. С. 45–50. EDN: RYMKFL.
6. Бутырин М.В., Хуснидинов Ш.К., Сосницкая Т.Н., Замашиков Р.В. Оценка опасности загрязнения окружающей природной среды тяжелыми металлами в условиях Иркутской области // Плодородие. 2017. № 6. С. 45–48. EDN: YMJWOM.
7. Белоголова Г.А., Гордеева О.Н., Коваль П.В., Джао К.Х., Гао Г.Л. Закономерности распределения и формы нахождения тяжелых металлов в техногенно-трансформированных черноземах южного Приангарья и Северо-Восточного Китая // Почвоведение. 2009. № 4. С. 429–440. EDN: JXOUNF.
8. Бакалова Д.П., Чижков Ю.С., Трусова В.В. Использование экспресс-методов анализа в геоэкологическом мониторинге // Перспективы развития горно-металлургической отрасли (Игошинские чтения): материалы Всерос. науч.-практ. конф. (г. Иркутск, 26 ноября 2021 г.). Иркутск, 2022. С. 62–66. EDN: RZZKGE.



9. Matinde E., Simate, G.S., Ndlovu S. Mining and metallurgical wastes: a review of recycling and re-use practices // Journal of the Southern African Institute of Mining and Metallurgy. 2018. Vol. 118. Iss. 5. P. 825. <https://doi.org/10.17159/2411-9717/2018/v118n8a5>.

10. Мязин В.П., Литвинцев С.А. Повышение эффективности гравитационного извлечения золота из комплексных золотополиметаллических руд // Известия Сибирского отделения секции наук о Земле Российской академии естественных наук. Геология, разведка и разработка месторождений полезных ископаемых. 2018. Т. 41. № 1. С. 126–136. <https://doi.org/10.21285/2541-9455-2018-41-1-126-136>. EDN: YXCMFW.

11. Александрова Т.Н., Таловина И.В. Платиновые металлы аподунитовых кор выветривания и оценка возможности их эффективного обогащения в гравитационных аппаратах // Физико-технические проблемы разработки полезных ископаемых. 2017. № 3. С. 141–147. EDN: ZAGVED.

12. Алгебраистова Н.К., Бурдакова Е.А., Маркова А.С., Макшанин А.В. Обогащение благороднометалльного сырья на центробежных аппаратах // Цветные металлы. 2017. № 1. С. 18–22. <https://doi.org/10.17580/tsm.2017.01.03>. EDN: YGJQCR.

13. Кусков В.Б., Кускова Я.В. Гравитационное обогащение флюоритовых руд Амдерминского месторождения // Обогащение руд. 2017. № 6. С. 20–25. <https://doi.org/10.17580/or.2017.06.04>. EDN: ZWMLPT.

14. Соколов В.А., Киров С.С., Богатырева Е.В., Гаспарян М.Д. Получение диоксида циркония из цирконового концентрата по экологически безопасным технологиям // Цветные металлы. 2023. № 3. С. 46–53. <https://doi.org/10.17580/tsm.2023.03.07>. EDN: JLIHR.

15. Пелевин А.Е., Шигаева В.Н. Возможность получения ильменитового концентрата из отходов обогащения титаномагнетитовой руды // Обогащение руд. 2022. № 2. С. 46–52. <https://doi.org/10.17580/or.2022.02.08>. EDN: DCNLJQ.

16. Худояров С.Р., Якубов М.М., Пирматов Р.Х., Валиев Х.Р. Техногенные ресурсы черной металлургии и их комплексная переработка в условиях АО «Узметкомбинат» // Черные металлы. 2022. № 2. С. 67–71. <https://doi.org/10.17580/chm.2022.02.12>.

17. Кожонов А.К., Молдобаев Э.С., Алмакучукова Г.М., Орозова Г.Т. Технологический подход к переработке лежалых хвостов золотоизвлекательных фабрик // Известия Кыргызского государственного технического университета им. И. Раззакова. 2022. № 4. С. 402–413. <https://doi.org/10.56634/16948335.2022.4.402-401>. EDN: HLHTWM.

18. Лаврик А.В., Рассказова А.В. Исследование возможности применения технологии гравитационного обогащения золотосодержащих кварцевых руд при освоении месторождения «Делькен» // Кулагинские чтения: техника и технологии производственных процессов: материалы XX Междунар. науч.-практ. конф. (Чита, 30 ноября – 4 декабря 2020 г.). Чита, 2020. С. 32–35. EDN: ZLCBOF.

19. Хохуля М.С., Фомин А.В., Алексеева С.А., Карпов И.В. Ресурсосберегающая технология получения гематитового концентрата из складированных хвостов обогатительного производства АО «Олкон» // Горный журнал. 2020. № 9. С. 85–90. <https://doi.org/10.17580/gzh.2020.09.12>. EDN: ZELWMK.

20. Пузик А.Ю. Перспективы использования хвостов обогащения хромитовых руд Сарановского месторождения как источника хрома и платинидов // Горное эхо. 2019. № 4. С. 3–9. <https://doi.org/10.7242/echo.2019.4.1>. EDN: YZBWYX.

21. Сапинов Р.В., Куленова Н.А., Суюндиков М.М., Олейникова Н.В. Перспективы получения олова из техногенного сырья в Казахстане // Вестник Восточно-Казахстанского государственного технического университета им. Д. Серикбаева. 2019. № 3. С. 155–160. EDN: RHXEVA.

22. Богомяков Р.В., Литвинова Н.М., Рассказова А.В., Лаврик Н.А. Использование гравитационных процессов при переработке золошлаковых материалов // Маркшейдерия и недропользование. 2019. № 5. С. 50–52.

23. Терещенко С.В., Алексеева С.А., Рухленко Е.Д., Кремнецкая И.П., Мосендз И.А. О возможности переработки техногенных отходов добычи флогопитового сырья // Горный информационно-аналитический бюллетень (научно-технический журнал). 2017. № 10. С. 186–193. <https://doi.org/10.25018/0236-1493-2017-10-0-186-193>. EDN: ZQJLNZ.

24. Прохоров К.В., Богомяков Р.В., Лаврик Н.А., Литвинова Н.М. К вопросу извлечения золота из магнитного концентрата золошлакового материала // Горный информационно-аналитический бюллетень (научно-технический журнал). 2016. № 21. С. 272–281. EDN: WRKMDF.

25. Tastanov Y., Serzhanova N., Ultarakova A., Sadykov N., Yerzhanova Z., Tastanova A. Recycling of chrome-containing waste from a mining and processing plant to produce industrial products // Processes. 2023. Vol. 11. Iss. 6. P. 1659. <https://doi.org/10.3390/pr11061659>.

26. Han Z., Golev A., Edraki M. A review of tungsten resources and potential extraction from mine waste // Minerals. 2021. Vol. 11. Iss. 7. P. 701. <https://doi.org/10.3390/min11070701>.

27. Whitworth A., Forbes E., Verster I., Jokovic V., Awatey B., Parbhakar-Fox A. Review on advances in mineral processing technologies suitable for critical metal recovery from mining and processing wastes // Cleaner Engineering and Technology. 2022. Iss. 7. P. 100451. <https://doi.org/10.1016/j.clet.2022.100451>.

28. Зашихин А.В. Гравитационные сепараторы новой конструкции // Металлургия цветных, редких и благородных металлов: сб. докл. XVI Междунар. конф. (г. Красноярск, 5–8 сентября 2023 г.). Красноярск, 2023. С. 394–399. <https://doi.org/10.47813/sfu.mnfrpm.2023.394-399>. EDN: SVLMOV.



References

1. Kachor O.L., Parshin A.V., Trusova V.V. An integrated approach to the geoecological assessment of accumulated damage objects. *Teoreticheskaya i prikladnaya ekologiya = Theoretical and Applied Ecology*. 2022;4:65-71. (In Russ.). <https://doi.org/10.25750/1995-4301-2022-4-065-071>. EDN: ADEBVY.
2. Kachor O.L., Parshin A.V., Trusova V.V., Kurina A.V. Determination of adverse impact of the former Vostsibelement plant industrial site on environmental objects. In: *Tekhnologii pererabotki otkhodov s polucheniem novoi produktsii: materialy IV Vseros. nauch.-prakt. konf = Waste recycling technologies to obtain new products: materials of the 4th All-Russian scientific and practical conference*. 30 November 2012, Kirov. Kirov; 2022, p. 247-250 (In Russ.). EDN: ODGNBY.
3. Bogdanov A.V., Shkrabo A.I., Shatrova A.S. Process engineering solutions for reclamation of former Vostsibelement battery plant industrial site. *Nauki o Zemle i nedropol'zovanie = Earth Sciences and Subsoil Use*. 2023;46(1):84-96. (In Russ.). <https://doi.org/10.21285/2686-9993-2023-46-1-84-96>. EDN: DZMCEJ.
4. Baenguev B.A., Belogolova G.A., Chuparina E.V., Prosekin S.N., Dolgikh P.G., Pastukhov M.V. Lead distribution and forms of lead-containing compounds in the technogenic soil, Svirsk town, South Baikal region. *Izvestiya Tomskogo politekhnicheskogo universiteta. Inzhiniring georesursov = Bulletin of the Tomsk Polytechnic University. Geo Assets Engineering*. 2022;333(8):205-214. (In Russ.). <https://doi.org/10.18799/24131830/2022/8/3670>. EDN: KDNQGI.
5. Khusnidinov Sh.K., Sosnitskaya T.N., Butyrin M.V., Zamashchikov R.V. The evaluation of soil pollution by heavy metals and arsenic in the town of Svirsk of Irkutsk region. *Vestnik Buryatskoi gosudarstvennoi sel'skokhozyaistvennoi akademii im. V.R. Filippova = Vestnik of Buryat State Academy of Agriculture named after V. Philippov*. 2014;1:45-50. (In Russ.). EDN: RYMKFL.
6. Butyrin M.V., Khusnidinov Sh.K., Sosnitskaia T.N., Zamaschikov R.V. Risk assessment of environmental pollution with heavy metals in the Irkutsk oblast. *Plodorodie*. 2017;6:45-48. (In Russ.). EDN: YMJWOM
7. Belogolova G.A., Gordeeva O.N., Koval P.V., Zhou Q.X., Guo G.L. Regularities of the distribution and heavy metal forms in technogenically transformed chernozems of the southern Angara river basin and Northeastern China. *Pochvovedenie = Soil Science*. 2009;4:429-440. (In Russ.). EDN: JXOUNF.
8. Bakalova D.P., Chizhkov Yu.S., Trusova V.V. Using rapid analysis methods in geoecological monitoring. In: *Perspektivy razvitiya gorno-metallurgicheskoi otrasli (Igoshinskie chteniya): materialy Vseros. nauch.-prakt. konf. = Mining and Metallurgical Industry Development Prospects (Igoshin Readings): materials of the All-Russian scientific and practical conference*. 26 November 2022, Irkutsk. Irkutsk; 2022, p. 62-66. (In Russ.). EDN: RZZKGE.
9. Matinde E., Simate, G.S., Ndlovu S. Mining and metallurgical wastes: a review of recycling and re-use practices. *Journal of the Southern African Institute of Mining and Metallurgy*. 2018;118(5):825. <https://doi.org/10.17159/2411-9717/2018/v118n8a5>.
10. Myazin V.P., Litvintsev S.A. Improving efficiency of gold recovery from complex gold-polymetallic ores by gravity separation. *Izvestiya Sibirskogo otdeleniya seksii nauk o Zemle Rossiiskoi akademii estestvennykh nauk: Geologiya, razvedka i razrabotka mestorozhdenii poleznykh iskopaemykh = Proceedings of the Siberian Department of the Section of Earth Sciences of the Russian Academy of Natural Sciences: Geology, Exploration and Development of Mineral Deposits*. 2018;41(1):126-136. (In Russ.). <https://doi.org/10.21285/2541-9455-2018-41-1-126-136>. EDN: YXCMFW.
11. Aleksandrova T.N., Talovina I.V. Platinum-group metals in residual soils and potential efficiency of their processing in gravity concentrators. *Fiziko-tekhnicheskie problemy razrabotki poleznykh iskopaemykh*. 2017;3:141-147. (In Russ.). EDN: ZAGVED.
12. Algebraistova N.K., Burdakova E.A., Markova A.S., Makshanin A.V. Ore dressing of precious metal bearing rocks in centrifugal machines. *Tsvetnye metally*. 2017;1:18-22. (In Russ.). <https://doi.org/10.17580/tsm.2017.01.03>. EDN: YGJQCR.
13. Kuskov V.B., Kuskova Ya.V. The Amderminskoye deposit fluorite ores gravity concentration. *Obogashchenie rud*. 2017;6:20-25. (In Russ.). <https://doi.org/10.17580/or.2017.06.04>. EDN: ZWMLPT.
14. Sokolov V.A., Kirov S.S., Bogatyreva E.V., Gasparyan M.D. Production of zirconium dioxide from zircon concentrate using environmentally friendly technology. *Tsvetnye metally*. 2023;3:46-53. (In Russ.). <https://doi.org/10.17580/tsm.2023.03.07>. EDN: JLIEHR.
15. Pelevin A.E., Shigaeva V.N. Possibility of obtaining ilmenite concentrate from titanomagnetite ore enrichment waste. *Obogashchenie rud*. 2022;2:46-52. (In Russ.). <https://doi.org/10.17580/or.2022.02.08>. EDN: DCNLJQ.
16. Khudoyarov S.R., Yakubov M.M., Pirmatov R.Kh., Valiev Kh.R. Technogenic resources of ferrous metallurgy and their complex processing in the conditions of JSC "Uzmetkombinat". *Chernye metally*. 2022;2:67-71. (In Russ.). <https://doi.org/10.17580/chm.2022.02.12>.
17. Kozhonov A.K., Moldobaev E.S., Almakychykova G.M., Orozova G.T. Technological solutions for processing tails of gold recovery factories. *Izvestiya Kyrgyzskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta im. I. Razzakova = Proceedings of the Kyrgyz State Technical University named after I. Razzakov*. 2022;4:402-413. (In Russ.). <https://doi.org/10.56634/16948335.2022.4.402-401>. EDN: HLHTWM.



18. Lavrik A.V., Rasskazova A.V. Studying the possibility to use gravity concentration technology for gold-bearing quartz ores under Delken deposit development. In: *Kulaginskiye chteniya: tekhnika i tekhnologii proizvodstvennykh protsessov: materialy XX Mezhdunar. nauch.-prakt. konf. = Kulagin Readings: equipment and technologies of production processes: materials of the 20th International scientific and practical conference*. 30 November – 4 December 2020, Chita. Chita; 2020, p. 32-35. (In Russ.). EDN: ZLCBOF.
19. Khokhulya M.S., Fomin A.V., Alekseeva S.A., Karpov I.V. Resource-saving technology for hematite concentration from storage mill tailings at Olkon mining and processing works. *Gornyi zhurnal*. 2020;9:85-90. (In Russ.). <https://doi.org/10.17580/gzh.2020.09.12>. EDN: ZELWMK.
20. Puzik A.Yu. Application prospects of Saranovskoye deposit chromite ore enrichment tailings as chromium and platinide compound source. *Gornoe ehkho*. 2019;4:3-9. (In Russ.). <https://doi.org/10.7242/echo.2019.4.1>. EDN: YZBWYX.
21. Sapinov R.V., Kulenova N.A., Suyundikov M.M., Oleinikova N.V. Prospects for tin production from technogenic raw materials in Kazakhstan. *Vestnik Vostochno-Kazakhstanskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta im. D. Serikbaeva = Bulletin of D. Serikbayev East Kazakhstan technical university*. 2019;3:155-160. (In Russ.). EDN: RHXEVA.
22. Bogomyakov R.V., Litvinova N.M., Rasskazova A.V., Lavrik N.A. Application of gravity processing for coal ash. *Marksheideriya i nedropol'zovanie*. 2019;5:50-52. (In Russ.).
23. Tereshchenko S.V., Alekseeva S.A., Rukhlenko E.D., Kremenetskaya I.P., Mosendz I.A. Phlogopite mining waste processibility. *Gornyi informatsionno-analiticheskii byulleten' (nauchno-tekhnicheskii zhurnal) = Mining Informational and Analytical Bulletin (Scientific and Technical Journal)*. 2017;10:186-193. (In Russ.). <https://doi.org/10.25018/0236-1493-2017-10-0-186-193>. EDN: ZQJLNZ.
24. Prohorov K.V., Bogomyakov R.V., Lavrik N.A., Litvinova N.M. Additional recovery of gold from magnetic concentrate of ash. *Gornyi informatsionno-analiticheskii byulleten' (nauchno-tekhnicheskii zhurnal) = Mining Informational and Analytical Bulletin (Scientific and Technical Journal)*. 2016;21:272-281. (In Russ.). EDN: WRKMDF.
25. Tastanov Y., Serzhanova N., Ultarakova A., Sadykov N., Yerzhanova Z., Tastanova A. Recycling of chrome-containing waste from a mining and processing plant to produce industrial products. *Processes*. 2023;11(6):1659. <https://doi.org/10.3390/pr11061659>.
26. Han Z., Golev A., Edraki M. A review of tungsten resources and potential extraction from mine waste. *Minerals*. 2021;11(7):701. <https://doi.org/10.3390/min11070701>.
27. Whitworth A., Forbes E., Verster I., Jokovic V., Awatey B., Parbhakar-Fox A. Review on advances in mineral processing technologies suitable for critical metal recovery from mining and processing wastes. *Cleaner Engineering and Technology*. 2022;7:100451. <https://doi.org/10.1016/j.clet.2022.100451>.
28. Zashikhin A.V. New gravity separators. In: *Metallurgiya tsvetnykh, redkikh i blagorodnykh metallov: sb. dokl. XVI Mezhdunar. konf. = Metallurgy of non-ferrous, rare and precious metals: collected reports of the 16th International conference*. 5–8 September 2023, Krasnoyarsk. Krasnoyarsk; 2023, p. 394-399. (In Russ.). <https://doi.org/10.47813/sfu.mnfrpm.2023.394-399>. EDN: SVLMOV.

Информация об авторах / Information about the authors



Трусова Валентина Валерьевна,

кандидат технических наук,
старший научный сотрудник департамента геоэкологии,
институт «Сибирская школа геонаук»,
Иркутский национальный исследовательский технический университет,
г. Иркутск, Россия,
старший научный сотрудник лаборатории геохимии рудообразования
и геохимических методов поисков,
Институт геохимии им. А.П. Виноградова СО РАН,
г. Иркутск, Россия,
✉ vvtrusova@geo.istu.edu

<https://orcid.org/0000-0002-8168-9537>

Valentina V. Trusova,

Cand. Sci. (Eng.),
Senior Researcher of the Geoecology Department,
Siberian School of Geosciences,
Irkutsk National Research Technical University,
Irkutsk, Russia,
Senior Researcher of the Laboratory of Geochemistry of Ore Formation
and Geochemical Prospecting Methods,
A.P. Vinogradov Institute of Geochemistry SB RAS,
Irkutsk, Russia,
✉ vvtrusova@geo.istu.edu

<https://orcid.org/0000-0002-8168-9537>

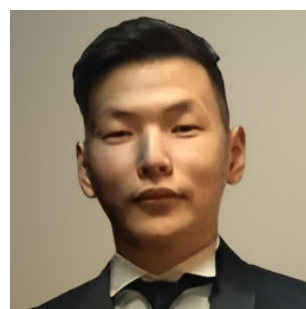


Качор Ольга Леонидовна,

доктор технических наук,
руководитель департамента геоэкологии,
институт «Сибирская школа геонаук»,
Иркутский национальный исследовательский технический университет,
г. Иркутск, Россия,
olgakachor@geo.istu.edu
<https://orcid.org/0000-0003-1889-9934>

Olga L. Kachor,

Dr. Sci. (Eng.),
Head of Geoecology Department,
Siberian School of Geosciences,
Irkutsk National Research Technical University,
Irkutsk, Russia,
olgakachor@geo.istu.edu
<https://orcid.org/0000-0003-1889-9934>

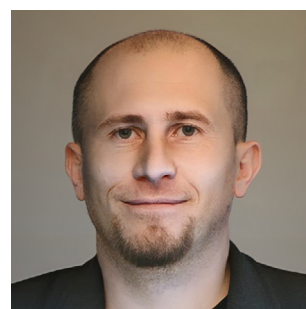


Алексеев Айаал Семенович,

аспирант,
Институт геохимии им. А.П. Виноградова СО РАН,
г. Иркутск, Россия,
младший научный сотрудник,
Иркутский научно-исследовательский институт
благородных и редких металлов и алмазов,
г. Иркутск, Россия,
jr.alexeev@gmail.com
<https://orcid.org/0009-0005-8014-9570>

Ayaal S. Alekseev,

Postgraduate Student,
A.P. Vinogradov Institute of Geochemistry SB RAS,
Irkutsk, Russia,
Junior Researcher,
Irkutsk Research Institute of Precious and Rare Metals and Diamonds,
Irkutsk, Russia,
jr.alexeev@gmail.com
<https://orcid.org/0009-0005-8014-9570>



Паршин Александр Вадимович,

кандидат геолого-минералогических наук,
научный руководитель института «Сибирская школа геонаук»,
Иркутский национальный исследовательский технический университет,
г. Иркутск, Россия,
научный сотрудник лаборатории геохимии рудообразования
и геохимических методов поисков,
Институт геохимии им. А.П. Виноградова СО РАН,
г. Иркутск, Россия,
sarhin@geo.istu.edu
<https://orcid.org/0000-0003-3733-2140>

Alexander V. Parshin,

Cand. Sci. (Geol. & Mineral.),
Scientific Director of the Siberian School of Geosciences,
Irkutsk National Research Technical University,
Irkutsk, Russia,
Researcher of the Laboratory of Geochemistry of Ore Formation
and Geochemical Prospecting Methods,
A.P. Vinogradov Institute of Geochemistry SB RAS,
Irkutsk, Russia,
sarhin@geo.istu.edu
<https://orcid.org/0000-0003-3733-2140>

Вклад авторов / Contribution of the authors

Все авторы сделали эквивалентный вклад в подготовку публикации.
The authors contributed equally to this article.

**Конфликт интересов / Conflict of interests**

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.
The authors declare no conflicts of interests.

*Все авторы прочитали и одобрили окончательный вариант рукописи.
The final manuscript has been read and approved by all the co-authors.*

Информация о статье / Information about the article

Статья поступила в редакцию 14.09.2023; одобрена после рецензирования 13.10.2023; принята к публикации 01.12.2023.

The article was submitted 14.09.2023; approved after reviewing 13.10.2023; accepted for publication 01.12.2023.