

Минерально-сырьевой потенциал и комплексное использование природных и техногенных месторождений вольфрама Джидинского рудного поля (г. Закаменск, Республика Бурятия)

Самсонов А. А., Бурмистров А. А., Тельнов А. Е.

Московский государственный университет им. М. В. Ломоносова, г. Москва, Россия

Аннотация. В работе приведён обзор опубликованных и фондовых данных по геологическому строению, вещественному составу и разработанным технологиям переработки руд Барун-Нарынского и других техногенных месторождений, образовавшихся в ходе многолетней отработки природных молибденовых и вольфрамовых месторождений Джидинского рудного поля. На основе статистического анализа этих материалов и аналитических исследований авторов произведена приближённо-количественная оценка минерально-сырьевого потенциала природных и техногенных месторождений района по комплексу широкого спектра попутных компонентов в рудах. Показаны современные возможности комплексной переработки накопленного в этом районе техногенного сырья и перспективы решения существующих проблем в будущем.

Ключевые слова: техногенное месторождение, комплексная переработка минерального сырья, эколого-экономическая оценка.

Для цитирования: Самсонов А. А., Бурмистров А. А., Тельнов А. Е. Минерально-сырьевой потенциал и комплексное использование природных и техногенных месторождений вольфрама Джидинского рудного поля (г. Закаменск, Республика Бурятия). Руды и металлы. 2024. № 1. С. 17–35. DOI: 10.47765/0869-5997-2024-10002.

Potential mineral resources and multi-component use of natural and technogenic tungsten deposits of the Dzhida ore field (city of Zakamensk, Republic of Buryatia)

Samsonov A. A., Burmistrov A. A., Tel'nov A. E.

Lomonosov Moscow State University, Russia

Abstract. The article provides an overview of published and deposited data on the geological structure, mineral and chemical composition of ores, and the ore processing technologies for the Barun-Naryn and other technogenic deposits formed during long-term exploitation of natural molybdenum and tungsten deposits of the Dzhida ore field. Based on statistical analysis of these data and on author's laboratory analytical studies, the mineral potential of the natural and technogenic deposits of the region was approximately quantitatively assessed for a wide complex of by-product components of the ores. Modern possibilities of multi-element processing of the technogenic raw materials accumulated in this area and outlook for solving the actual problems in the future are demonstrated.

Key words: technogenic deposit, multi-element processing of mineral raw materials, environmental and economic assessment.

For citation: Samsonov A. A., Burmistrov A. A., Tel'nov A. E. Potential mineral resources and multi-component use of natural and technogenic tungsten deposits of the Dzhida ore field (city of Zakamensk, Republic of Buryatia). Ores and metals, 2024, № 1, pp. 17–35. DOI: 10.47765/0869-5997-2024-10002.



Введение. Актуальность изучения и комплексного использования техногенных отходов горнорудной промышленности возрастает с каждым годом. Отходы являются одним из основных факторов нарушения экологического равновесия в биосфере Земли, начавшегося ещё в прошлом столетии. Минерально-сырьевой комплекс ежегодно производит более 200 млрд т горной массы, из которой извлекается, как правило, только очень незначительная часть полезных компонентов [1]. Это прежде всего относится к рудам благородных, цветных, редких и радиоактивных металлов. Большое количество попутных компонентов остаётся в раздробленной массе отвалов и тонкой фракции хвостов обогащения руд и быстро переходит в природную окружающую среду (ОС) под действием ветровой эрозии и поверхностных кислых вод [16]. Полезные попутные компоненты становятся опасными загрязнителями ОС. Процесс их рассеивания (до концентраций меньше ПДК) происходит далеко за пределами площадей складирования этих отходов, а также в населённых пунктах около горных предприятий. Фактор времени (годы и десятилетия) ещё больше усиливает техногенное воздействие.

В экономическом отношении техногенные месторождения имеют следующие преимущества по сравнению с природными: руды техногенных месторождений представляют собой наиболее обогащённые полезными компонентами части отвалов или хвостов обогащения, которые находятся на дневной поверхности на площадях с уже подготовленной инфраструктурой. Основной проблемой их освоения является отсутствие технологических схем комплексной переработки либо слишком большая её стоимость по сравнению с существующими ценами минерального сырья на мировом рынке. Тем не менее, хотя бы частичная переработка техногенных отходов становится всё более реальной благодаря появлению новых технологий. Оставшееся минеральное сырьё может и должно быть изолировано от внешней среды до появления возможности использования его в будущем.

В данной работе предпринята попытка обобщения и анализа имеющейся и дополни-

тельно полученной авторами информации по геологии и геохимии природных и техногенных месторождений полезных ископаемых одного из старейших горнорудных районов России, показаны необходимость и возможность их комплексного изучения и дальнейшего использования.

Краткая геологическая характеристика природных месторождений вольфрама и молибдена Джидинского рудного поля. Природные месторождения изучаемого района представлены двумя штокверковыми рудными объектами – Первомайским молибденовым и Инкурским вольфрамовым, а также жильным Холтосонским вольфрамовым месторождениями, расположенными в непосредственной близости друг от друга и образующими Джидинское рудное поле в 7 км юго-восточнее г. Закаменска.

В геологическом строении Джидинского рудного поля принимают участие хохюртовская осадочно-эффузивная свита (C_1hh), Модонкульский диоритовый массив ($\delta_1\gamma PZ_1d$) и многофазная Гуджирская гранитоидная интрузия ($\gamma_1\gamma Jq$), с которой связано формирование молибден-вольфрамового оруденения. На дневной поверхности Гуджирская интрузия представлена Первомайским штоком гранит-порфиров (0,35 км²) лакколитообразной формы и роями даек кислого и умеренно-щелочного состава. Среди пород дайкового комплекса наиболее распространены кварцевые сиенит-порфиры и сиениты, значительно уступают им по количеству керсантиты, бостониты и гранит-порфиры. Дайки имеют северо-западное, субширотное, северо-восточное и субмеридиональное простирание при углах падения от 30° и более (рис. 1).

В тектоническом отношении Джидинское рудное поле приурочено к узлу пересечения Джидинского глубинного разлома субмеридионального простирания с региональными зонами разломов субширотного и северо-западного простираний, в совокупности образующими обширную магмо-рудоконтролирующую структуру. Это явилось важным фактором многоэтапного формирования здесь крупных месторождений с комплексной рудной минерализацией (табл. 1–3): ранней штокверковой



полевошпат-кварц-(берилл)-молибденитового состава, развитой в апикальной части Первомайского штока (Первомайское месторождение), поздней штокверковой кварц-мусковит-гюбнеритового состава (Инкурское месторождение) и жильной кварц-гюбнеритовой (Холтосонское месторождение). В жильном поле известно более 200 жил среднего и крутого падения. Инкурское месторождение обрамляет Первомайский массив гранит-порфиров в форме полукольца с юго-западной и западной сторон. Рудный штокверк развит в кварцевых диоритах Модонкульского массива и частично в метаморфизованных осадочно-вулканогенных породах хохюртовской свиты. Штокверк протягивается приблизительно на 2500 м при ширине 800–850 м и разведан на глубину 470–500 м. Вмещающие породы в экзоконтактах рудных жил и прожилков Инкурского месторождения превращены в березиты, которые образуют жило- или линзообразные тела с нечёткими границами, имеют размеры от первых сантиметров до первых десятков метров по мощности. Березитизация выражается в появлении кварц-мусковитовой ассоциации с пиритом, карбонатом и флюоритом, замещающей первичные породы, причём с удалением от прожилков степень березитизации снижается [7].

Детальное изучение вещественного состава руд, включающих в технологическом плане как сами жилы и прожилки, так и изменённые вмещающие породы, имеет важное значение для предварительного анализа состава техногенных руд и оценки перспектив их комплексного использования, а также выбора природоохранных мероприятий (ПМ) по защите ОС. Как будет показано ниже, при обогащении руд в концентрат извлекается только часть рудных компонентов, причём это в основном вольфрам и молибден, коэффициенты извлечения которых наибольшие – 70–90 %. В гораздо меньшей степени (особенно в период деятельности Джидинского ВМК) это касается попутных компонентов, многие из которых относятся к I и II классам опасности. Эти компоненты только частично попадают в концентраты с вольфрамитом и молибденитом (содержание в концентратах 60–70 % WO_3 и 50–

55 % Мо соответственно), а также с другими минералами.

Краткая геологическая характеристика, история формирования и изучения техногенных месторождений в районе г. Закаменска. В результате многолетней работы Джидинского ВМК (1936–1996 гг.) добыто и переработано более 40 млн т руды с различным содержанием WO_3 (см. табл. 1) (Технико-экономическое обоснование..., 2011). Это руды Первомайского молибденового, Инкурского и Холтосонского вольфрамовых месторождений. Хвосты обогащения руд складированы в двух хвостохранилищах. Между хвостохранилищами на участке аварийного сброса сформировался третий отвал техногенных отходов (рис. 2).

Первое насыпное хвостохранилище, называемое также Джидинским месторождением, сформировано самотёчным методом и непосредственно примыкает к городской застройке г. Закаменска. Формирование хвостохранилища производилось с 1936 по 1970 г. Оно представляет собой линзовидную залежь песков площадью 660 × 300 м средней мощностью 10,6 м. Впоследствии под влиянием водной эрозии значительная часть материала хвостов мигрировала по долине р. Модонкуль вплоть до её устья с образованием шлейфов делювиально-техногенных, пролювиально- и аллювиально-техногенных песков. Общая протяжённость сформированного к настоящему времени слоя лежалых техногенных песков составляет 6–6,5 км. Объём техногенных песков Джидинского месторождения – около 4 млн т. По своему положению относительно селитебной зоны г. Закаменска оно является основным источником загрязнения окружающей среды. В связи с этим вопрос о переработке техногенных песков Джидинского месторождения необходимо решать с двух точек зрения: как объекта для промышленного освоения и как объекта, подлежащего ликвидации в связи с его повышенной экологической опасностью.

Второе хвостохранилище – Барун-Нарынское месторождение, расположенное в устье р. Барун-Нарын. В результате выполнения ЗАО «Геотехнологии» и специалистами других профильных организаций программы «Технико-экономическая оценка техногенных

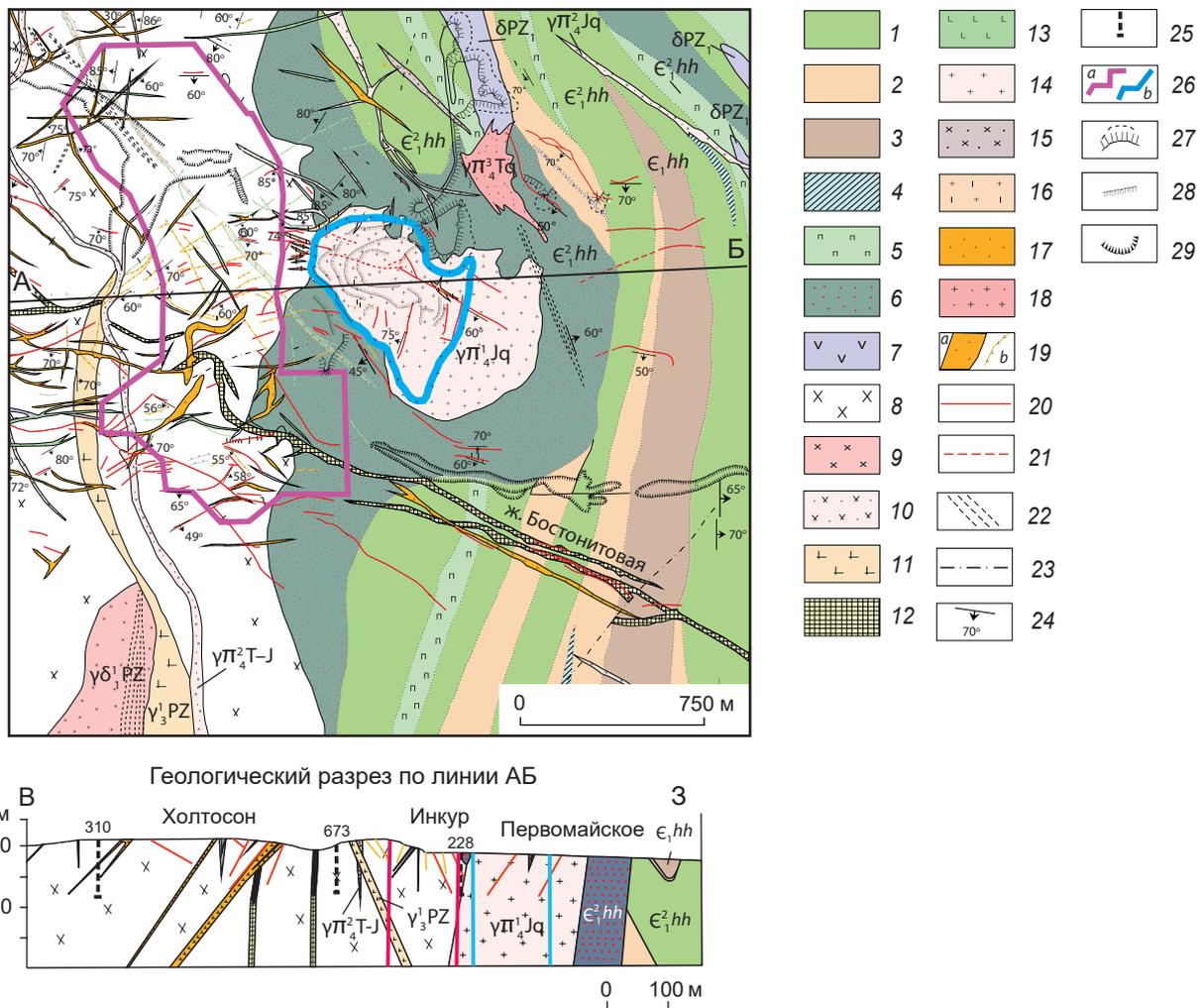


Рис. 1. Геологическая карта и геологический разрез Джидинского рудного поля (по Ю. П. Гусеву и др., 2011):
хохюртовская свита (ϵ_1^{hh}): 1 – метаморфизованные сланцы, 2 – метаморфизованные карбонатные сланцы, 3 – кремнистые сланцы, 4 – известковистые сланцы, 5 – диабазовые, роговообманковые, плагиоклазовые порфириды, спилиты, альбитофиры, 6 – контактовые роговики и роговиковые сланцы, 7 – серпентиниты и тальковые сланцы по пироксенитам; джидинский интрузивный комплекс I фаза ($\delta_1^1 \gamma PZ, d$): 8 – кварцевые диориты (δ_1^1), 9 – гранодиориты ($\gamma\delta_1^1$), 10 – микродиориты и диоритовые порфириды ($m\delta_1\delta\pi$), 11 – плагиограниты (γ_1^3); куналейский интрузивный комплекс ($\xi\xi\pi T_k$): 12 – бостониты ($\xi\pi^4$), 13 – сиенит-порфиры и кварцевые сиенит-порфиры ($\xi_1\pi$, $q\xi\pi^3$); гуджирский интрузивный комплекс ($\gamma_1 \gamma \pi Jq$): 14 – лейкограниты, гранит-порфиры ($\gamma_1 \gamma \pi_4^1$), 15 – микрогранит-порфиры ($\gamma \pi_4^2$), 16 – аплит-порфиры (i_4^4), 17 – серые сиениты (χ_4^5), 18 – горкинские розовые гранит-порфиры ($\gamma \pi_4^3$), 19 – дайковые тела: *a* – выраженные в масштабе, *b* – невыраженные; 20 – кварц-гюбнеритовые жилы; 21 – жилы роговикового кварца (безрудные); 22 – тектонические зоны, выраженные в масштабе; 23 – тектонические нарушения, не выражающиеся в масштабе; 24 – элементы залегания пород; 25 – буровые скважины; 26 – контуры штокверков: *a* – Инкурского вольфрамового, *b* – Первомайского молибденового; контуры: 27 – отвалов вскрышных пород, 28 – карьеров отработки штокверков, 29 – отработки россыпей

Fig.1. Geological map and section of the Dzhida ore field (after Gusev et al., 2011):
Khokhyurt Formation (ϵ_1^{hh}): 1 – metamorphosed shales, 2 – metamorphosed carbonate shales, 3 – cherty shales, 4 – calcareous shales, 5 – diabase, hornblende, and plagioclase porphyrites; spilites; and albitophyres, 6 – contact hornfels and hornified shales, 7 – serpentinites and talc schists after pyroxenites; Dzhida Intrusive Complex, I phase ($\delta_1^1 \gamma PZ, d$): 8 – quartz diorites (δ_1^1), 9 – granodiorites ($\gamma\delta_1^1$), 10 – microdiorites and diorite porphyries ($m\delta_1\delta\pi$), 11 – plagiogranites (γ_1^3); Kunalei Intrusive Complex ($\xi\xi\pi T_k$): 12 – bostonites ($\xi\pi^4$), 13 – syenite porphyries and quartz syenite porphyries ($\xi_1\pi$, $q\xi\pi^3$); Gudzhir Intrusive Complex ($\gamma_1 \gamma \pi Jq$): 14 – leucogranites, granite porphyries ($\gamma_1 \gamma \pi_4^1$), 15 – microgranite porphyries ($\gamma \pi_4^2$), 16 – aplite porphyries (i_4^4), 17 – grey syenites (χ_4^5), 18 – Gorkin pink granite porphyries ($\gamma \pi_4^3$), 19 – dike bodies: *a* – expressed in scale, *b* – not expressed; 20 – quartz-gybenite veins; 21 – veins of hornfels quartz (barren); 22 – tectonic zones, expressed in scale; 23 – tectonic disturbances, not expressed in scale; 24 – elements of rock occurrence; 25 – boreholes; 26 – outlines of stopes: *a* – Incur tungsten, *b* – Primomaysk molybdenum; outlines: 27 – waste of waste rock, 28 – open-pit mine outlines, 29 – processing of alluvial deposits



phase I ($\delta_1\gamma PZ_1d$): 8 – quartz diorites (δ_1^1), 9 – granodiorites ($\gamma\delta_1^1$), 10 – microdiorites and diorite porphyrites ($m\delta_1\delta\pi$), 11 – plagiogranites (γ_1^3); Kunaley Intrusive Complex ($\xi\xi\pi T_k$): 12 – bostonites ($\xi\pi^4$), 13 – syenite porphyries and quartz syenite porphyries ($\xi_1\pi$, $q\xi\pi^3$); Gudzhir Intrusive Complex ($\gamma_1\gamma\pi Jq$): 14 – leucogranites and granite porphyries ($\gamma_1\gamma\pi_4^1$), 15 – microgranite porphyries ($\gamma\pi_4^2$), 16 – aplite porphyries (i_4^4), 17 – gray syenites (χ_4^5), 18 – Gorkinsky pink granite porphyries ($\gamma\pi_4^3$), 19 – dykes: *a* – in scale and *b* – out of scale; 20 – quartz–huebnerite veins; 21 – hornified quartz veins (barren); 22 – fault zones, in scale; 23 – tectonic fractures, out of scale; 24 – strata attitudes; 25 – boreholes; 26 – outlines of the stockworks: *a* – Inkur, tungsten-bearing, *b* – Pervomaisk, molybdenum-bearing; 27 – outlines of overburden dumps; 28 – outlines of stockwork mining quarries; 29 – outlines of placer mining

отложений обогатительной фабрики Джидинского ВМК», утверждённой правительством Республики Бурятия в 1999 г., было обосновано промышленное значение Барун-Нарынского месторождения как наиболее перспективного и первоочередного объекта работ, в котором сосредоточено более 80 % всех заскладированных отходов Джидинского ВМК. Барун-Нарынское месторождение разведано бурением скважин по сети (160–180) × 100 м, средняя мощность отложений 26 м. Пробурены 44 скважины. Установлены два вида отложений: разнозернистые пески и илы (рис. 3).

Технология обогащения отработана для разнозернистых песков. Обогащение техногенных песков включает гравитацию и флотацию.

Конечный продукт – концентрат вольфрамовый гюбнеритовый флотационный с содержанием WO_3 40 %. Запасы подсчитаны по разнозернистым пескам методом вертикальных разрезов в геологических границах: кат. C_1 пески – 15 617 тыс. т, WO_3 – 21 660 т; кат. C_2 пески – 760 тыс. т, WO_3 – 877 т. Прогнозные ресурсы кат. P_1 по илам составляют 19 023 тыс. т, WO_3 – 18 262 т. По данным ЗАО «Закаменск», в хвостохранилище числится 35 млн т переработанной руды с содержанием WO_3 0,071 %; по данным ОТК обогатительной фабрики, существовавшей ещё в 1995 г., фактическое содержание WO_3 в текущих хвостах составляло не менее 0,1 %, а в последний период работы достигло 0,17 %.

Табл. 1. Характеристика утверждённых остаточных запасов и результатов отработки месторождений Джидинским ВМК [6, 13]

Table 1. Characteristics of the approved residual reserves and of results of mining of the ore deposits by the Dzhida Tungsten-Molybdenum Plant [6, 13]

	Месторождения		
	Инкурское	Холтосонское	Первомайское
Запасы WO_3 кат. C_1 , тыс. т	171	5,7	
WO_3 , % (для кат. C_1)	0,15	0,75	
Запасы WO_3 кат. C_2 , тыс. т	13,6	26,7	
WO_3 , % (для кат. C_2)		0,9	
Забалансовые запасы WO_3 , тыс. т	32,9	0,6	
WO_3 , % (для забалансовых запасов)		0,4	
Отработано руды, млн т	35	5,2	4,3
Произведено концентрата, тыс. т	47	92	17
WO_3 , тыс. т	30,6	60	
Mo, тыс. т			9

Примечание. Значения, определённые по содержаниям WO_3 и Mo в произведённых концентратах, выделены жирным.

Табл. 2. Обобщённый минеральный состав руд Инкурского, Первомайского и Холтосонского месторождений (по [7], с дополнениями авторов)
Table 2. Generalized mineral composition of ores of the Inkursky, Pervomaisky, and Kholtosonsky deposits (modified after [7])

Ассоциации	Минералы		Примеси
Жильные	Главные	Кварц SiO_2 Полевой шпат $(\text{K, Na})[\text{AlSi}_3\text{O}_8]$ Флюорит CaF_2 Мусковит $\text{KAl}_2[\text{AlSi}_3\text{O}_{10}](\text{OH, F})_2$ Карбонат CaCO_3	
	Второстепенные	Розенбергит $\text{AlF}[\text{F}_{0.5}(\text{H}_2\text{O})_{0.5}]_4 \cdot \text{H}_2\text{O}$ Топаз $\text{Al}_2[\text{SiO}_4](\text{OH, F})_2$ Гюбнерит MnWO_4 Пирит FeS_2 Халькопирит CuFeS_2 Сфалерит ZnS Галенит PbS	(Ta, Nb, Th, Sc) (Co, Ni, As, Cu, Au, Se) (Se, Tl, Te, Ag, Au) Cd 0,49–0,96 мас. % (Ag, Bi)
Рудные	Редкие	Тетраэдрит Cu_3SbS_3 Айкинит PbCuBiS_3 Молибденит MoS_2 Касситерит SnO_2 Шеелит CaWO_4 Гессит Ag_2Te Борнит Cu_5FeS_4 Берилл $\text{Be}_3\text{Al}_2[\text{Si}_6\text{O}_{18}]$ Сильванит $(\text{Au, Ag})\text{Te}_4$ Петцит Ag_3AuTe_2	Fe – 0,62, Zn – 7,30, Ag – 0,74, Bi до 1,59 мас. % (Te, Au) (Re, Ti, Nb, V, Zn, As, Se, Cu) (Ta, Nb, Ti, Mn, Zr) (Mn, Sr, Nb, Ta, Cr, F, Cu, PЗЭ, Mo, Sr)
	Редкие	Линдстремит $\text{Pb}_3\text{Cu}_3\text{Bi}_7\text{S}_{15}$ Хаммарит $\text{Pb}_2\text{Cu}_2\text{Bi}_4\text{S}_9$ Сульфовисмутит Cu и Ag (Ag, Cu) $_{16}\text{Sb}_2\text{S}_{11}$ Монацит $(\text{Ce, La, Th})[\text{PO}_4]$ Англезит PbSO_4 Ковеллин CuS	
		Вторичные	

Примечание. В скобках приведены общераспространённые примеси в указанных минералах.



Табл. 3. Результаты химического анализа руд Инкурского месторождения (г/т)

Table 3. Results of chemical analysis of ores of the Inkursky deposit (g/t)

№ пробы	Li	Be	Ti	V	Cr	Mn	Co	Ni	Cu	Zn	Ga	Rb	Sr	Y	Zr	Hg	La	Ce	Pr	Nd	Sm	Eu	Gd
Ин 525-194	3452	205	3168	166	945	6285	55	304	72	597	30	3110	11	12	24	0	6,1	15	2	8,8	2,2	0,46	2,2
Ин 525-197	2583	30	2963	189	589	11163	17	174	34	495	45	2460	18	16	18	0,01	5,8	14	1,8	8	2,3	0,77	2,5
Ин 362-247.5	459	39	1659	119	71	1189	8	93	171	166	29	1098	50	7	10	0	2,7	5,8	0,75	3,5	1	0,33	0,97
Ин 525-183	112	3	175	16	20	368	1	28	25	109	7	143	3	1	3	0	12	17	1,4	4,6	0,61	0,15	0,61
Ин 362-243	587	75	5883	124	7	1940	81	41	87	279	18	1379	344	13	145	0	31	61	7,7	33	6,6	2,2	6
Ин 525-171	708	33	2003	261	17	1220	12	103	25	145	93	1408	23	19	8	0	4,9	10	1,4	6,2	1,8	0,74	2,7
Ин 525-200	8	0	25	0	7	264	17	130	885	9	1	12	0	0	1	0	0,13	0,28	< 0,1	0,15	< 0,1	< 0,1	< 0,1
Ин 525-172	1207	58	3352	211	18	1775	22	11	23	176	51	1827	49	14	15	0,04	3	7,2	1,1	4,9	1,8	0,86	2,3
Ин 525-181	391	203	8221	107	7	1529	39	32	67	291	18	968	188	24	183	0	30	62	8,5	38	8,3	2,3	8,2
Ин 525-180	530	51	8139	203	15	2219	33	107	124	405	26	1457	134	19	158	0,01	29	70	9,4	42	8,8	2,8	8,6
№ пробы	Tb	Dy	Ho	Er	Tm	Yb	Lu	Hf	Nb	Mo	Cd	Sn	Sb	Te	Ba	Ta	W	Re	Tl	Pb	Bi	Th	U
Ин 525-194	0,35	2,1	0,41	1,1	0,19	1,4	0,21	0,98	4	14	0	18	0,2	0,4	106	0,2	28	0,01	109	19	20	0,5	1,7
Ин 525-197	0,49	3,6	0,81	2,5	0,62	5,5	1,1	0,76	6	11	3	41	0,1	0,7	125	0,2	29618	2,32	157	19	10	0,9	15,2
Ин 362-247.5	0,19	1,2	0,26	0,73	0,11	0,86	0,15	0,27	3	117	1	25	0,1	0,8	127	0,1	250	0,02	59	150	85	0,3	1,7
Ин 525-183	< 0,1	0,34	< 0,1	0,18	< 0,1	0,22	< 0,1	< 0,1	1	3	1	8	0,2	0,1	24	0,1	595	0,06	1	14	5	1,3	2,5
Ин 362-243	0,72	3,5	0,63	1,4	0,2	1,6	0,23	2,9	5	1	0	6	0,2	0,6	738	0,2	120	0,01	57	68	8	2,8	1,8
Ин 525-171	0,46	3,4	0,72	2,3	0,34	2,8	0,46	0,24	9	31	0	148	0,1	0,7	79	0,1	36	0,01	43	9	4	1	0,9
Ин 525-200	< 0,1	< 0,1	< 0,1	< 0,1	< 0,1	0,05	< 0,1	< 0,1	0	80	1	1	7,6	2,8	0	0,1	12	0,01	1	3760	6593	0	0
Ин 525-172	0,44	3	0,59	1,7	0,29	2,2	0,35	0,39	2	13	1	44	0,1	0,7	175	0,1	795	0,09	75	25	20	0,2	2,2
Ин 525-181	1,16	6,2	1,2	2,9	0,47	3,1	0,51	3,5	7	2	0	3	0,4	0,9	200	0,3	292	0,03	29	55	38	2,7	5,6
Ин 525-180	1,21	6	1	2,6	0,39	2,7	0,43	3,1	8	1	0	8	0,4	0,9	164	0,4	685	0,06	30	28	3	3	8,3

Примечание. Пробы отобраны авторами из керна скважин; выделены цветом элементы, средние содержания которых, по представленным в таблице данным, более чем в 4–5 раз превышают их кларки; исследования выполнены методом ИСП-МС с использованием масс-спектрометра с индуктивно-связанной плазмой, адаптированного для работы с системой лазерного пробоя SUPEC 7000, приобретенного по Программе развития МГУ. Аналитик с. н. с. кафедры геохимии И. Ю. Николаева.

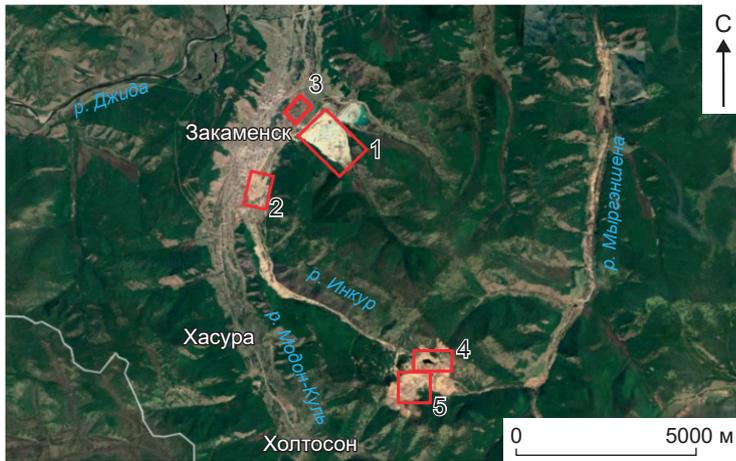


Рис. 2. Схема размещения техногенных объектов в районе г. Закаменск:

техногенные месторождения: 1 – Барун-Нарынское, 2 – Джидинское, 3 – Модонкульское; территории карьеров, штолен и отвалов природных месторождений: 4 – Первомайского, 5 – Инкурского и Холтосонского

Fig. 2. Layout of technogenic objects in the area of Zakamensk:

Technogenic deposits: 1 – Barun-Naryn; 2 – Dzhida, 3 – Modonkul; territories of quarries, adits, and dumps of the natural ore deposits: 4 – Pervomaisky, 5 – Inkursky and Kholtosonsky

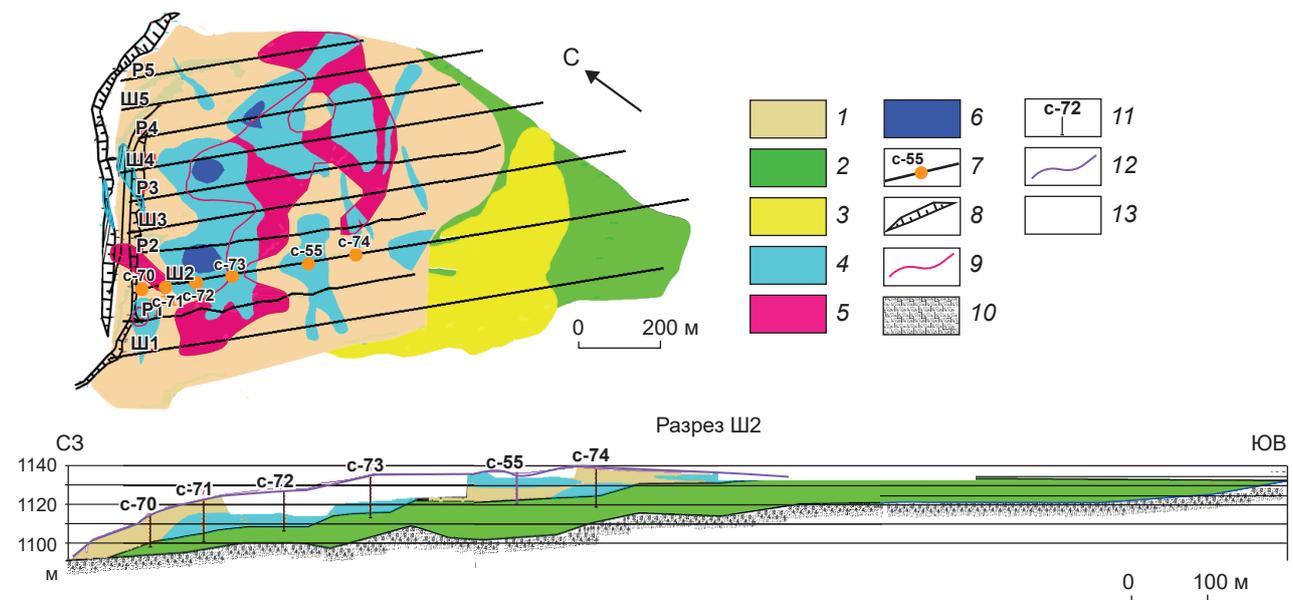


Рис. 3. Геологическая схема Барун-Нарынского техногенного месторождения с данными по содержаниям WO_3 и серы на горизонте +1125 м и геологический разрез по разведочному профилю Ш2:

вольфрамворудные пески (1) и илы (2); 3 – сульфидные пески; геохимические ореолы с содержаниями WO_3 (4 – более 0,09 %, 5 – более 0,15 %), S (6 – более 2 %); 7 – разведочные профили со скважинами и их номерами; 8 – дамба хвостохранилища; 9 – контуры ореолов серы в пределах площади ореолов WO_3 ; 10 – аллювий долины р. Барун-Нарын; 11 – разведочные скважины и их номера; 12 – контур поверхности хвостов до отработки; 13 – открытая поверхность долины р. Барун-Нарын

Fig.3. Schematic geological map of the Barun-Naryn technogenic deposit with data on the contents of WO_3 and sulfur on the level +1125 m and the geological section along the exploration Profile Ш2:

tungsten mineral stuff: (1) sands and (2) silts; 3 – sulfide sands; geochemical halos: 4 – WO_3 concentration more than 0.09 %, 5 – WO_3 concentration more than 0.15 %; 6 – S concentration more than 2 %; 7 – exploration profiles with boreholes and their numbers; 8 – tailings dam; 9 – outlines of sulfur halos within the WO_3 halos; 10 – alluvium of the Barun-Naryn River valley; 11 – exploration boreholes with their numbers; 12 – outline of the tailings surface before mining; 13 – open surface of the Barun-Naryn River valley



Заполнение Барун-Нарынского хвостохранилища, в пределах которого в дальнейшем было выявлено техногенное месторождение, начато в 1958 г. и прекращено в 1997 г. в связи с остановкой Джидинского ГОКа. Транспортировка хвостов обогащения в гидроотвал производилась совместно с сульфидным продуктом по пульпопроводу. Хвостохранилище имеет в плане форму овала шириной у основания (дамбы) около 1050 м. Протяжённость гидроотвала вверх по долине р. Барун-Нарын около 1700 м. Хвостохранилище сформировано в результате сброса отходов обогащения как молибденовой фабрики (до 1972 г.), так и вольфрамовых фабрик. Изучение возможности доизвлечения вольфрама и комплексной переработки текущих хвостов предпринималось комбинатом совместно с Институтом естественных наук БФ СО АН СССР и институтом ВНИПИГорцветмет в 1985 г. На опытной установке, смонтированной на фабрике Инкур-1, по флотационно-гравитационной схеме в течение девяти смен из исходных хвостов с содержанием (в %): WO_3 – 0,11, $S_{\text{сульф.}}$ – 1,9, CaF_2 – 3,63, получены следующие продукты: вольфрамовый (содержание WO_3 – 14,2 %, извлечение – 38,3 %); сульфидный (содержания (в %): Pb – 0,24, Cu – 0,23, Zn – 0,59, S – 17,5 при выходе 2,52 % и извлечениях, соответственно, (в %): 79,77, 83,07, 87,7, 93,44); флюоритовый концентрат ФФ-92 с извлечением CaF_2 – 50,1 % и выходе 1,95 %; слюдяной продукт с выходом 17,2 %.

На территории Барун-Нарынского месторождения располагается сульфидный спецотвал (см. рис. 3), представленный пиритовой сыпучкой с примесью зёрен сфалерита, галенита, халькопирита, блёклых руд, гюбнерита, шеелита, сульфосолей Bi и Ag, а также теллуридов Au и Ag. По данным Гинцветмета на 1960 г., сульфидный продукт содержал 0,6 % WO_3 , 0,1 % Mo, 4,2 г/т Au и 867 г/т Ag. По оценке Института естественных наук Бурятского филиала СО АН СССР (Ходанович П. Ю., 1987 г.), объём сульфидного продукта 30 тыс. т.

Третий отвал, образованный в результате аварийного сброса хвостов обогащения в долине р. Модон-Куль, получил название Модон-

кульского месторождения техногенных отходов. Располагается оно на продолжении Джидинского месторождения техногенных песков напротив дамбы Барун-Нарынского месторождения. Вытянуто по долине р. Модон-Куль на 900 м при ширине от 120 до 550 м. Это хвостохранилище может представлять промышленный интерес с ресурсами 1 млн т песков, 1330 т WO_3 с содержанием WO_3 0,126 %. В 1995 г. «Гиредмет» по заданию ЦНИГРИ выполнил технологические исследования на пробе хвостов с содержанием WO_3 0,42 %, в результате которых по гравитационно-флотационной схеме получен товарный вольфрамовый концентрат с содержанием WO_3 68,39 %, извлечением WO_3 73,81 %, и промпродукты доводки (содержание WO_3 0,59 %, извлечение 8,49 %). При флотации выделен сульфидный продукт, содержащий 2,04 г/т золота и 147,6 г/т серебра. В 2006–2007 гг. ООО НИиПИ «ТОМС» по заданию ООО «Закаменск» составлен технологический регламент для разработки проекта и технический проект «Обогатительная установка по переработке технологических отложений Джидинского ВМК». При разработке проекта были использованы утверждённые БурТКЗ забалансовые запасы кат. С₂ и ресурсы кат. Р₁ в количестве 9842 тыс. т руды (песков), 15 274 т WO_3 и 894 кг золота.

Значения средних содержаний рудных компонентов (табл. 4) Барун-Нарынского, Модонкульского и Джидинского месторождений примерно равны, что следует из общей истории формирования этих объектов, описанной в этой работе. Содержания рудных компонентов, представленные в табл. 3, должны быть близки к таковым в отвалах Инкурского месторождения, так как пробы отобраны нами из интервалов керна, представленных в основном бедными рудами.

Сброс хвостов в хвостохранилище осуществлялся в виде пульпы при соотношении Т : Ж = 1 : (12–15). С 1958 по 1972 г. в хвостохранилище попадали хвосты обогащения с двух фабрик – Молибденовой, перерабатывающей руду Первомайского штокверка, и Холтосонской, перерабатывающей вольфрамовую руду Холтосонского жильного месторождения.

Табл. 4. Обобщённая характеристика рудного потенциала техногенных образований Джидинского ВМК (Технико-экономическое обоснование..., 2011)

Table 4. Generalized characteristics of the ore potential of technogenic formations of the Dzhida Tungsten-Molybdenum Plant (Feasibility study..., 2011)

Техногенные образования (месторождения), год окончания формирования	Запасы и ресурсы руды, млн т	WO ₃ , тыс. т	Площадь, га	WO ₃ , %	Ag, г/т	Au, г/т	Mo, %	Pb, %	Zn, %	Bi, %	Cu, %	S, %
Джидинское, 1970 г.	4	4	20 (60) ¹	0,1								
Сульфидный спецотвал, 1960 г.	0,03	0,03	1,2	0,6	867	4,2	0,1					40
Барун-Нарынское, 1997 г.	35,4	40,8	160	0,12	8	0,05	0,005	0,06	0,07	0,006	0,03	2,2
Барун-Нарынское, запасы попутных компонентов, т					0,3	0	2	24	28	2,4	12	880
Модонкульское, 1996 г.	1	15,3	27	0,1								
Карьеры и отвалы, 1996 г.	4	0,2	380	0,05								

Примечание. ¹ С учётом сноса песков и илов по долине р. Модон-Куль. Жирным выделены ориентировочно подсчитанные значения по косвенным данным.

Объёмы переработки, размер частиц при помолу и состав перерабатываемой руды существенно отличались. Так, при переработке молибденовых руд Первомайского штокверка осуществлялся помол исходной руды до крупности 0,1–0,5 мм. Помол вольфрамовой руды Холтосонского жильного месторождения производился до 2–3 мм. Объёмы переработки молибденовой фабрики были в несколько раз больше объёмов переработки Холтосонской фабрики. Руды Первомайского молибденового штокверка кварц-полевошпатового состава и Холтосонского месторождения в основном кварцевые. С 1973 по 1996 г. в хвостохранилище сбрасывались отходы обогащения Холтосонской и Инкурской вольфрамовых фабрик. Сульфидный продукт флотации при переработке руд сначала складировался в отдельный отвал или сбрасывался в хвостохранилище с остальными отходами. Переработка различных по составу руд, крупность помола, водно-шламовая среда формирования отложений определили разнородность и слоистость накопленных отходов, наличие постоянно наблюда-

ющихся в массиве прослоев песков, богатых сульфидами, мощностью до 0,5 м и более. По проекту строительства и формирования хвостохранилища, разрабатывавшегося ОАО «Сибцветметниипроект», заполнение его должно было осуществляться по секциям («картам»), ограниченным направляющими валами, сооружавшимися из тех же техногенных песков, при этом фракция -0,074 мм, согласно условиям проекта, должна осаждаться на расстоянии от точки сброса (трубы пульповода) не ближе, чем 150 м. Исходя из необходимости соблюдения этого условия соответствующим образом регулировалась высота, на которой пульповод располагается над местностью, сложенной хвостами, и ширина карты. По мере заполнения хвостохранилища пульповод постепенно перемещался на более высокие отметки (с 1090–1095 м до 1145 м) по вертикали и в плане с северо-западного (от дамбы) направления на юго-восток, т. е. на 350–400 м по горизонтали. В юго-восточной части площади хвостохранилища постоянно существовал пруд-отстойник технической воды, используе-



мый для оборотного водоснабжения обогатительных фабрик, который претерпел такую же миграцию по мере заполнения хвостохранилища. После остановки Джидинского ГОКа в 1996 г. пруд-отстойник ликвидировался за счёт испарения и фильтрации. Наиболее возвышенная часть и дамба хвостохранилища оказались под воздействием эоловых и водных процессов, которые приводят к выдуванию мелких фракций с поверхности песков, размыву склонов дамбы и песков (хвостов).

Геологическое строение Барун-Нарынского техногенного месторождения. Вначале следует отметить тот факт, что понятие «техногенное месторождение» (ТМ) появилось ещё в СССР в связи необходимостью решения проблем техногенного воздействия на ОС, источником которого, прежде всего, являлась горнодобывающая отрасль экономики [4]. Процессы образования ТМ имеют смешанный характер: техногенный и природный. Последний из них связан с геологическими экзогенными процессами (гипергенезом). Со временем благодаря технологическому прогрессу в области обогащения минерального сырья становится возможным рассматривать отходы обогащения ряда природных месторождений как техногенные руды.

На Барун-Нарынском техногенном месторождении отсутствует почвенно-растительный покров. Его поверхность относительно ровная, расчленённая мелкими бороздками струйчатого размыва (Технико-экономическое обоснование..., 2011). Насыпная дамба гидроотвала в сторону р. Модон-Куль размыва временными водотоками с образованием оврагов, конусов выноса и небольших оползней. На поверхности хвостохранилища отмечаются специфические дефляционные формы: замкнутые понижения, западины выдувания и небольшие барханные гряды, бугры, поперечные преобладающим северо-западным и юго-восточным ветрам. Геологическое строение Барун-Нарынского месторождения обусловлено: 1) спецификой его формирования как хранилища хвостов нескольких обогатительных фабрик, перерабатывавших руды Первомайского молибденового (в начальный период) и Инкурского и

Холтосонского вольфрамовых месторождений по существовавшим технологическим схемам и режимам обогащения; 2) спецификой накопления хвостов и формирования дамбы; 3) условиями водооборота (пруд-отстойник – обогатительная фабрика); 4) влиянием ветровой и водной эрозии в последние четыре-пять лет после остановки обогатительных фабрик.

В настоящее время Барун-Нарынское месторождение представляет собой единую крупную залежь овальной в плане формы (см. рис. 3). Основание залежи повторяет рельеф ложа р. Барун-Нарын. Общая мощность техногенных отложений, слагающих долину р. Барун-Нарын, изменяется от 0 м на границе с вмещающими породами до 45–47 м в центральной части. Границей месторождения в северо-западной части является дамба, сложенная теми же техногенными отходами с примесью бутового камня и металлического лома. По гранулометрическому составу отложения разделяются на два типа: разнозернистые пески и илистые отложения (илы). Между этими разновидностями осадков существуют постепенные переходы. Для всей толщи песков характерна слоистость, которая обусловлена чередованием осадков разного гранулометрического состава, разного цвета (от тёмно-зелёного до светло-жёлтого и серого) и разного вещественного состава (кварц-полевошпатовая нерудная часть и сульфидная с магнетитом, гематитом, гидроксидами железа и марганца). Мелкозернистые осадки (алевритистые, с темноцветными амфиболом, гематитом, гётитом) обычно образуют тонкие (первые миллиметры – сантиметры) слойки. Залегание всей толщи осадков субгоризонтальное с преобладающим падением в 1–5° в северных румбах. В приповерхностном слое техногенных отложений в районе дамбы отмечаются небольшие линзы щебня мощностью 5–20 см и протяжённостью до 10–15 м.

Разнозернистые пески расположены в северо-западной и центральной частях месторождения, что обусловлено осаждением их вблизи очага разгрузки – пульповода. Ширина их полосы 700–1000 м, по простиранию они занимают всю долину – 900–1000 м. Цвет



песков серо-жёлтый, желто-зелёный. Гранулометрический состав переменный – от мелкозернистых до крупнозернистых разностей. По вертикали разнозернистые пески занимают в основном верхние горизонты отложений.

Илистые отложения (илы) залегают на основании ложа долины р. Барун-Нарын (аллювиально-делювиальных отложениях) и занимают в основном нижние горизонты техногенного отвала. На поверхности илы выделены в юго-восточной части месторождения. Илы представлены более тонкими частицами отходов обогащения тёмно-серого, тёмно-зелёного, голубовато-зелёного цвета с прослойками песков серовато-жёлтого цвета. Основная особенность их строения – более однородная, более массивная текстура с реже проявленной и менее отчётливо выраженной слоистостью.

Статистический анализ вещественного состава руд Барун-Нарынского техногенного месторождения. Корреляционный анализ базы данных (Технико-экономическое обоснование..., 2011) по химическому и гранулометрическому составу руд из керна разведочных скважин (около 2000 проб) Барун-Нарынского техногенного месторождения показал наличие значимых связей между содержанием WO_3 и S – коэффициент парной корреляции (КПК) = +0,4 [14]. Установлена тенденция роста содержаний вольфрама с глубиной в песках мелких фракций и снижение его для крупных фракций (табл. 5).

Возможно, что это связано с более лёгким переносом мелких фракций вольфрамита поверхностными водами на глубину по сравнению с его более крупными фракциями.

В то же время связь между размерами фракций вольфрамита и содержанием серы в песках обратная: для скважин глубиной 15–20 м КПК = -0,76 (30 проб), для скважин глубиной 10 м КПК = -0,77 (18 проб).

Это в целом согласуется с относительно недавно проведёнными исследованиями [17], согласно которым в общем богатые вольфрамом участки представлены в основном мелкими фракциями, залегающими на более глубоких уровнях в песках. Барун-Нарынское техногенное месторождение сложено несцементирован-

ным, плохо отсортированным песком, состоящим из угловатых обломков, чаще кварца и полевых шпатов, более редких темноцветных минералов, мусковита, флюорита, губнерита, шеелита, пирита, сфалерита, галенита, блёклых руд, халькопирита, молибденита, сульфосолей висмута. Преобладают обломки крупнее 0,25 мм (более 60 %), среди них обломки размером 0,25–0,5 мм составляют 16,6–31,8 %. Массовая доля в песках шламовой фракции (-0,08 мм) варьирует от 6,9 до 25,4 %. Анализ указывает на концентрацию 52,53 % WO_3 во фракции -0,1+0 мм. Отмечается наличие вольфрама (37,85 %) и в средних классах крупности -1+0,5 и -0,5+0,2 мм, содержащих 0,05 % металла. Золото концентрируется в основном в мелких классах -0,2+0 мм, наиболее продуктивная фракция -0,071 мм. Определено, что основные потери вольфрама и золота в хвосты Джидинского ВМК происходили за счёт мелких классов и сростков с пустой породой.

Для приближённо-количественного определения средних содержаний компонентов в техногенных рудах был проведён корреляционный и регрессионный анализы данных опробования скважин, предоставленных авторам этой работы геологами АО «ЗАКАМЕНСК», построены гистограммы распределения содержаний WO_3 и серы по скважинам и планы в изолиниях их содержаний на поверхности хвостов (табл. 6, см. рис. 3). По скважинам разведочного профиля Ш2 отобраны девять проб песков и одна илов (БН-И), в которых методом ICP-MS были определены содержания широкого спектра элементов (см. табл. 6).

Приближённо-количественная статистическая оценка средних содержаний этих элементов ($C_{срп}$) в техногенных рудах производилась по известным средним содержаниям ($C_{ср}$) ряда компонентов, установленных по опробованию разведочных скважин и представленных в табл. 4 и 6 с использованием уравнений линейной регрессии:

$$y = a + b \cdot x, \text{ где } x = C_{ср}, y = C_{срп}.$$

Условие для выбора пар элементов с известными (x) и определяемыми (y) содержаниями компонентов – наличие значимой корреляционной связи между ними, установлен-



Табл. 5. Коэффициенты парной корреляции (КПК) между содержаниями WO_3 и глубиной для различных гранулометрических классов песков

Table 5. Pair correlation coefficients (PCC) between the WO_3 content and depth for various granulometric classes of the sands

Гранулометрические классы песков, мм	> 2мм	-2+1	-1+0,5	-0,5+0,2	-0,2+0,071	< -0,071
КПК	0,01	-0,28	-0,36	-0,12	0,3	0,28

Примечание. Значимые коэффициенты выделены жирным.

Табл. 6. Химический состав проб керна скважин профиля Ш2 (см. рис. 3)

Table 6. Chemical composition of drilling core samples from boreholes of Profile Ш2 (see Fig. 3)

№ пробы	Be	P	V	Cr	Mn	Fe	Co	Ni	Cu	Zn	Ga	Ge	As	Zr
C-4501	40	504	57	23	705	15 369	2	7	57	229	22	3	99	27
C-1401	61	982	90	62	1119	28 035	16	23	200	588	21	5	124	11
C-1406/10	43	984	79	62	1059	26 850	16	23	186	467	18	4	41	12
C-1410	43	879	85	57	1038	27 373	15	20	213	552	19	4	12	10
C-5601	44	679	83	80	1061	23 540	13	25	204	714	18	4	15	9
C-5605	65	870	91	91	1021	22 684	13	27	186	592	18	5	8	9
C-5612	72	1128	113	108	1222	21 694	11	30	266	819	26	5	9	10
Z-32046	6	1060	127	162	961	34 620	27	131	79	152	17	2	20	21
Z-37012	44	1108	158	179	1977	24 393	10	48	296	774	28	5	9	11
БН-И	48	937	129	156	1576	23 970	10	40	317	653	28	5	8	7
№ пробы	Nb	Mo	Ru	Ag	Cd	Sn	Sb	Te	Hf	Ta	W	Au	Pb	Bi
C-4501	8	122	0,003	5	2	8	18	2	1,02	0,5	456	0,09	286	41
C-1401	2	12	< 0,001	5	6	9	10	2	0,36	0,1	591	0,03	316	26
C-1406/10	2	8	0,002	5	5	6	10	2	0,36	0,1	413	0,05	277	17
C-1410	2	11	< 0,001	8	6	7	12	2	0,40	0,1	476	0,07	406	21
C-5601	2	14	< 0,001	6	8	8	5	1	0,32	0,1	845	0,02	387	26
C-5605	2	11	0,002	5	7	8	13	1	0,34	0,1	482	0,02	274	26
C-5612	2	22	< 0,001	6	9	16	15	2	0,32	0,1	763	0,02	347	45
Z-32046	5	23	< 0,001	1	1	2	5	0	0,85	0,4	101	0,01	78,5	7
Z-37012	2	42	0,005	8	8	16	9	2	0,39	0,1	811	0,03	438	61
БН-И	2	39	0,004	11	6	18	13	2	0,29	0,1	739	0,02	445	70

Примечание. Средние содержания в рудах некоторых элементов, установленных по данным разведочного бурения (Технико-экономическое обоснование..., 2011), приведены в табл. 4.

ной по данным анализов проб авторов этой работы (см. табл. 3). Определение коэффициентов (a , b) в уравнениях линейной регрессии осуществлялось с использованием пакета Statistica Windows. Для расчётов были выбраны пары элементов, указанные в табл. 7.

Повышенные содержания WO_3 в песках характеризуются относительно высокими концентрациями сульфидов Zn, Cu, Pb и Bi с примесью Ag (табл. 8). Это связано с тем, что в богатых и рядовых штокверковых рудах, поступавших на обогатительную фабрику, обычно имелись прожилки и гнезда гюбнерита в ассоциации с сульфидами. С ними же ассоциировали и различные рудные элементы, в том числе рассеянные, не подлежавшие извлечению. Золото (судя по его обратной связи с цветными металлами и вольфрамом) в значительной степени могло быть свободным, находясь в кварце.

По установленным средним содержаниям каждого (i -го) элемента (C_{cp} , %) и известных запасов руды WO_3 (Q_{wo_3}) Барун-Нарынского и других месторождений этого района (см. табл. 4) была дана приближённо-количественная оценка их ресурсов (P_i) (табл. 9) по следующему соотношению:

$$P_i = Q_{wo_3} \cdot C_{cp}, \text{ где } Q_{wo_3} \approx 40,4 \text{ млн т.}$$

Многие из этих элементов являются опасными загрязнителями, переносимыми вместе с пылью или образующими водные растворы при воздействии серной кислоты, возникающей при окислении сульфидов (например, $CdSO_4 \cdot 8H_2O$). Находясь в техногенных рудах этого месторождения, а также в отходах после их обогащения (вторичные хвосты), они представляют серьёзную экологическую опасность для прилегающей к ним территории г. Закаменска, земель сельскохозяйственного назначения и, в определённой степени, также для озера Байкал, в бассейне которого они находятся. Например, ранее было установлено широкое распространение повышенных техногенных концентраций фтора (до 2 мг/л и более) в поверхностных водах Прибайкалья [10].

Прогнозные ресурсы рассчитывались для тех компонентов техногенных руд, содержания которых превышают ПДК, ОДК в хвостах

Табл. 7. Пары элементов, имеющих значимую парную корреляционную связь

Table 7. Pairs of elements with significant pair correlations

Пары элементов		Пары элементов	
1	2	1	2
Zn	Cd	Bi	Ga
Zn	As	Ag	Ge
Zn	Be	Ag	Zr
Cu	Mn	Ag	Ta
Cu	V	Au	Cr
Bi	Fe	Au	Te
Bi	Co	Au	Ni
Bi	Mo	W	Hf
Bi	Sn	(Mo)	Nb
Bi	Ru	(Fe)	Sb

Примечание. В столбцах «1» указаны элементы с известными средними содержаниями в рудах; в столбцах «2» – элементы, средние содержания которых определялись по уравнениям линейной регрессии; в скобках указаны элементы, средние содержания которых предварительно определялись по уравнениям регрессии.

Табл. 8. Значимые коэффициенты парной корреляции (КПК) между содержаниями рудных компонентов, рассчитанные по данным опробования разведочных скважин

Table 8. Significant pair correlation coefficients (PCC) between the concentrations of ore components, calculated based on data of sampling of the exploration boreholes

	Zn	Cu	Pb	Bi	WO_3
Au	-0,38	-0,34		-0,49	-0,43
Ag	0,8	0,54	0,9	0,46	0,45
Zn		0,62	0,69	0,52	0,54
Cu			0,46	0,59	0,57
Pb				0,36	0,42
Bi					0,43
S					0,4



Таблица 9. Приближённо-количественная оценка содержаний и прогнозных ресурсов основных и попутных компонентов техногенных месторождений Джидинского рудного поля

Table 9. Approximately quantitative assessment of the grades and forecasted resources of the main and by-product components of technogenic deposits of the Dzhida ore field

Компоненты	Au	Ag	Zn	Cu	Pb	Bi	S	W	Te	Ni	Ge	Zr	Ta	V	P
ПДК (ОДК, С _{фон.}), мг/кг			60	80	32	0,3	160	1,5	1	50	1,4	175	2	150	1500
Средние содержания, мг/кг	0,05	7,9	681	289	597	58	22 000	781	1	64	5	10	1	118	1013
Прогнозные ресурсы, тыс. т	0,002	0,3	30	13	26	3	956	34			0,2				
Компоненты	Be	Cd	As	Mn	Mo	Ga	Ru	Co	Fe	Sn	Hf	Nb	Sb	Cr	
ПДК (ОДК, С _{фон.}), мг/кг	10	2	2	850	10	30	0,4	50	3 %	4,5	4	12	4,5	90	
Средние содержания, мг/кг	417	82	239	148	47	27	32	8	2,2 %	15	3	4	17	128	
Прогнозные ресурсы, тыс. т	18	4	11		2		1			1			1	6	

и фоновые содержания в почвах [3, 8, 9, 11]. Если рассматривать природные запасы, оставшиеся в недрах (см. табл. 1), то массы попутных компонентов в хвостах и отвалах в будущем могут возрасти примерно в пять раз при условии использования прежних технологий обогащения.

Как ранние, рассмотренные нами выше, так и современные исследования технологий переработки техногенных месторождений Джидинского рудного поля направлены на извлечение основных или наиболее ценных попутных полезных компонентов. На основании исследований, проведённых НТЛ «ТОМС» и ЦНИГРИ по изучению физико-технических и технологических свойств лежалых хвостов Джидинского ВМК, предложена технологическая схема их обогащения [17]. Основным способом, заложенным в схему, является гравитационное обогащение песков с получением черного гравитационного вольфрамово-

го концентрата и последующей его доводкой флотационными и электромагнитными методами. Из хвостов исходной крупности можно извлечь 62,8 % свободных зёрен гюбнерита и 64,5 % свободных раскрытых зёрен шеелита.

По причине быстрого роста объёмов экологически опасных отходов горного производства в мире происходит переход к малоотходным и безотходным технологиям. Например, при отработке полиметаллического месторождения Янг (США) используется более 92 % извлекаемой горной массы [1].

Другим интересным примером разработки безотходных технологий являются исследования ЦНИИОлово по комплексной переработке забалансовых касситерит-сульфидно-силикатных руд [1], которые по составу и структуре достаточно близки к штокверковому вольфрамовому оруденению в терригенных породах: они сложены кварцем, хлоритом, турмалином, флюоритом с мелкокристалличе-



ским касситеритом, станнином, пиритом, пиротином, сфалеритом, галенитом и сидеритом. Реже встречаются арсенопирит, галенит, вольфрамит, альбит, буланжерит, джемсонит, франкеит, прустит, пираргирит, блёклые руды, висмутин, серицит, топаз.

Необходимость приведения здесь этого примера продиктована ещё и тем, что переработка комплексных природных и техногенных руд требует применения «цепочек» большого спектра разных технологий обогащения, которые в таком случае позволяют получить в определённом смысле «синергетический» эффект от их совместного использования. При этом следует ещё раз подчеркнуть, что при извлечении максимально возможного количества попутных компонентов их можно рассматривать как полезные, в обратном случае – как вредные, т. е. в качестве загрязнителей ОС, эффект загрязнения которой будет только возрастать со временем. Также могут возникнуть и естественные зоны концентрации этих веществ: периодическое биологическое накопление в растениях, накопление на природных геохимических барьерах.

Значительная часть выше охарактеризованных рудных отвалов месторождений олова может быть переработана с применением мельниц самоизмельчения, в которых без обогащения выделяется до 50 % отвальной (по олову – пустой) породы, пригодной для строительных целей, и 5 % товарной руды с извлечением около 70–80 % олова. При сочетании процессов самоизмельчения, обогащения в тяжёлых средах и радиометрической сортировки из лежалых хвостов рентабельно извлекается до 50 % содержащегося в них олова.

Переработка продуктов флотационной доводки концентратов по схеме «деарсенизирующий обжиг – фьюмингование» предусматривает вывод мышьяка в товарные мышьяковистые возгоны и переработку получаемых сульфидных огарков фьюмингованием. Полученные возгоны перерабатываются по существующей схеме. Обеспечивается выпуск дополнительной продукции – Sn, Pb, Bi. При этом в два раза снижается выброс в атмосферу сер-

нистого газа. Попадающий в возгоны мышьяк представлен в основном водонерастворимыми малотоксичными формами – металлической и сульфидной. Оловосодержащие возгоны, в которые также вовлекается основная масса Pb, Bi, In и других металлов-спутников, перерабатываются совместно с богатыми оловянными концентратами методом восстановительной плавки на железистые шлаки с извлечением олова в черновой металл; Fe, W, Ta попадают в шлаки и извлекаются оттуда методом фьюмингования. Восстановительная плавка концентратов и фьюмингвозгонов осуществляется по схеме центробежного и вакуумного рафинирования (очистки продуктов от примесей, обычно в жидком состоянии). В итоге достигается повышение извлечения (в %): Sn – на 1–1,5, Pb – на 40–50, Bi – на 20–25, In – на 20–25, Cu – на 15–20, W – на 25–30, Ta – на 90. При этом снижается расход электроэнергии на 20–30 % по сравнению с ранее применявшейся технологией электроплавки. Очищенные от металлов фьюминговые шлаки пригодны для использования в цементной промышленности. При этом ликвидируются затраты по очистке концентратов гидрометаллургическими методами и полностью исключается применение дорогостоящих реагентов, резко снижается экологическая опасность загрязнений.

Институтом химии Уральского научного центра РАН разработана и прошла успешные промышленные испытания новая технология очистки сточных вод от сульфидов методом мокрой газоочистки. Затем сульфиды мышьяка и других металлов, осаждённые из сточных вод, передаются на деарсенизирующий обжиг, что позволяет дополнительно извлекать в товарную продукцию мышьяк и олово. Очищенные сточные воды используются в обороте – сокращается забор воды и сброс сточных вод. Технико-экономическим анализом определено, что в результате перевода обогачительно-металлургического передела оловосодержащего сырья в целом по подотрасли на безотходную технологию дополнительно может быть получено количество олова, равное объёму его выпуска крупным, вновь постро-



енным предприятием. Причём новое строительство потребовало бы в 10 раз больше капитальных вложений.

Приведённые примеры новых технологий во многом могут быть использованы и при переработке природных и техногенных руд вольфрама Джидинского рудного поля.

Заключение. Анализ данных по природным и техногенным месторождениям Джидинского рудного поля показал, что их минерально-сырьевой потенциал остаётся весьма значительным. Данные по минеральному составу руд, находящихся в техногенных образованиях, и статистическая оценка их химического состава показали, что они включают большое количество попутных компонентов, содержания и прогнозные ресурсы которых также значительны. Эти компоненты в основном относятся к I и II классам опасности и могут являться загрязнителями ОС, если они не будут извлекаться, оставаясь в отходах обогащения.

Следует подчеркнуть, что проведённые исследования носят предварительный характер: требуется массовое опробование природных и техногенных руд на максимально широкий спектр элементов. Это, в частности, видно из высокой изменчивости значений содержаний ряда элементов в приведённых результатах

анализов: в отдельных пробах содержания некоторых элементов соответствуют рядовым или даже богатым рудам, которые ещё в значительных количествах остаются в недрах, а отчасти и в техногенных образованиях.

В обобщающей работе по комплексному использованию руд месторождений различных рудно-формационных типов [12] показано, что такой подход позволяет увеличить стоимость продукции в 1,1–1,5 раза. Общий экономический эффект в этом случае также возрастает за счёт снижения платежей за загрязнение ОС и компенсацию ущерба сопряжённым ресурсам и населению [2]. Часть от этой дополнительной прибыли может быть направлена на природоохранные мероприятия, прежде всего на рекультивацию земель. Для стимулирования достижения подобных результатов требуется широкое использование экономического механизма регулирования сферы природопользования (субсидии, льготы и т. п.) на государственном уровне в сочетании с экологическим бизнесом [15]. Это позволит шире внедрять комплексные технологии переработки руд, а также проводить изоляцию остаточных масс техногенных отходов от ветровой эрозии и атмосферных осадков до времени их использования в будущем.

Список литературы

1. Арский Ю. М., Архипов Н. А., Петров И. В., Попов С. М. [и др.]. Рациональное природопользование в горной промышленности / Под ред. проф. В. А. Харченко. – М. : МГГУ, 1995. – 443 с.
2. Бурмистров А. А. Эколого-экономическая оценка месторождений (твёрдые полезные ископаемые): учебное пособие / Под ред. проф. В. И. Старостина. – М. : МГУ, 2002. – 186 с.
3. Водяницкий Ю. Н. Тяжёлые металлы и металлоиды в почвах. – М. : ГНЦ Почвенный институт им. В. В. Докучаева РАСХН, 2008. – 164 с.
4. Горная энциклопедия. Т. 5. – М. : Советская энциклопедия, 1991. – 541 с.
5. Гирусов Э. В., Бобылев С. Н., Новоселов А. Л., Чепурных Н. В. Экология и экономика природопользования. Учебник для вузов. – М. : Закон и право : Юнити, 1998. – 455 с.
6. Государственный баланс запасов полезных ископаемых Российской Федерации на 1 января 2021 года. Выпуск 15: Вольфрам. – М. : Росгеолфонд, 2021.
7. Дамдинова Л. Б., Дамдинов Б. Б. Минеральный состав и условия формирования руд Инкурского вольфрамового месторождения (Джидинское рудное поле, Юго-Западное Забайкалье) // Геология, поиски и разведка месторождений полезных ископаемых. – 2020. – Т. 43, № 3 (72). – С. 290–306.
8. Кидин В. В., Торшин С. П. Агрохимия: учебник. – М. : Проспект, 2016. – 608 с.
9. Козлова А. А., Халбаев В. Л., Айсуева Т. С., Егдуров А. Е., Нечаева В. В., Мокрушина А. С., Чиркова Е. Г., Винокурова А. В. Содержания различных форм железа в почвах Южного Предбайкалья // Международный журнал прикладных



- и фундаментальных исследований. – 2014. – № 5-2. – С. 56–61.
10. Ломоносов И. С., Гребенищикова В. И., Брюханова Н. Н., Носков Д. А., Яновский Л. М., Диденков Ю. Н. Распределение селена и фтора в компонентах окружающей среды Прибайкалья // Проблемы региональной экологии. – 2008. – № 5. – С. 28–32.
11. Минералого-геохимические критерии оценки экологической опасности горнопромышленных территорий. Методические рекомендации № 200. – М. : ИМГРЭ, 2020. – 53 с.
12. Наркелюн Л. Ф. Комплексное использование минерального сырья и горно-технологических отходов: учебное пособие. – Чита : ЧитГТУ, 1996. – 139 с.
13. Презентация инвестпроекта «Инкурское и Холтосонское месторождения вольфрамовых руд», ГК «Акрополь». – URL: nedradv.ru/nedradv/investsp?obj=4f458800fe129836fce938f3019c877. (дата обращения: 26.01.2024).
14. Тельнов А. Е. Барун-Нарынское техногенное месторождение вольфрама (Республика Бурятия, Закаменский район) // Новое в познании процессов рудообразования: сборник материалов Одиннадцатой Российской молодёжной научно-практической Школы, Москва, 28 ноября – 2 декабря 2022 г. – М. : ИГЕМ РАН, 2022.
15. Тишков А. Г. Экология экономически выгодна // Природоресурсные ведомости. – 2004. – № 21–22 (230–231). – С. 2–3.
16. Трофимов В. Т., Зилинг Д. Г., Барабошкина Т. А., Жигалин А. Д., Харькина М. А. Трансформация экологических функций литосферы в эпоху техногенеза. – М. : Ноосфера, 2006. – 720 с.
17. Федотов П. К., Петухов В. И., Федотов К. В., Бурдонов А. Е. Анализ направлений переработки лежалых хвостов Джидинского ВМК // Обогащение руд. – 2016. – № 1 (361). – С. 40–46.

References

1. Arskii Yu. M., Arkhipov N. A., Petrov I. V., Popov S. M. [i dr.]. Ratsional'noe prirodopol'zovanie v gornoi promyshlennosti [Rational nature management in the mining industry], ed. by prof. V. A. Kharchenko, Moscow, MGGU Publ., 1995, 443 p.
2. Burmistrov A. A. Ekologo-ekonomicheskaya otsenka mestorozhdenii (tverdye poleznye iskopaemye) [Ecological and economic assessment of deposits (solid minerals)], ed. by prof. V. I. Starostin, Moscow, MGU Publ., 2002, 186 p.
3. Vodyanitskii Yu. N. Tyazhelye metally i metalloidy v pochvakh [Heavy metals and metalloids in soils], Moscow, GNTs Pochvennyi institut im. V. V. Dokuchaeva RASKhN Publ., 2008, 164 p.
4. Gornaya entsiklopediya. T. 5 [Mining Encyclopedia. Vol. 5], Moscow, Sovetskaya entsiklopediya, 1991, 541 p.
5. Girusov E. V., Bobylev S. N., Novoselov A. L., Chernykh N. V. Ekologiya i ekonomika prirodopol'zovaniya. Uchebnik dlya vuzov [Ecology and economics of nature management], Moscow, Zakon i pravo Publ., Yuniti Publ., 1998, 455 p.
6. Gosudarstvennyi balans zapasov poleznykh iskopaemykh Rossiiskoi Federatsii na 1 yanvarya 2021 goda. Vypusk 15: Vol'fram [The State balance of mineral reserves of the Russian Federation as of January 1, 2021. Issue 15: Wolfram], Moscow, Rosgeolfond Publ., 2021.
7. Damdinova L. B., Damdinov B. B. Mineral'nyi sostav i usloviya formirovaniya rud Inkurskogo vol'framovogo mestorozhdeniya (Dzhidinskoe rudnoe pole, Yugo-Zapadnoe Zabaikal'e) [Mineral composition and formation conditions of the Inkur tungsten deposit ores (Dzhidinsky ore field, South-Western Transbaikalia)], *Geologiya, poiski i razvedka mestorozhdenii poleznykh iskopaemykh* [Geology, Prospecting and Exploration of Mineral Deposits], 2020, V. 43, No 3 (72), pp. 290–306. (In Russ.).
8. Kidin V. V., Torshin S. P. Agrokhimiya [Agrochemistry], Moscow, Prospekt Publ., 2016, 608 p.
9. Kozlova A. A., Khalbaev V. L., Aisueva T. S., Egodurov A. E., Nechaeva V. V., Mokrushina A. S., Chirkova E. G., Vinokurova A. V. Soderzhaniya razlichnykh form zheleza v pochvakh Yuzhnogo Predbaikal'ya [Contents of different forms of iron in the soils of Southern Predbaikal'ye], *Mezhdunarodnyi zhurnal prikladnykh i fundamental'nykh issledovaniy* [International journal of applied and fundamental research], 2014, No 5-2, pp. 56–61. (In Russ.).
10. Lomonosov I. S., Grebenshchikova V. I., Bryukhanova N. N., Noskov D. A., Yanovskii L. M., Didenkov Yu. N. Raspredelenie selena i fтора v komponentakh okruzhayushchei sredy Pribaikal'ya [Distribution of selenium and fluorine in environmental components of the Baikal region], *Problemy regional'noi ekologii* [Problems of regional ecology], 2008, No 5, pp. 28–32. (In Russ.).



11. Mineralogo-geokhimicheskie kriterii otsenki ekologicheskoi opasnosti gornopromyshlennykh territorii. Metodicheskie rekomendatsii № 200 [Mineralogical and geochemical criteria for assessing the environmental hazard of mining territories. Methodological recommendations No. 200], Moscow, IMGRE Publ., 2020, 53 p.
12. Narkelyun L. F. Kompleksnoe ispol'zovanie mineral'nogo syr'ya i gorno-tekhnologicheskikh otkhodov [Complex use of mineral raw materials and mining and technological waste], Chita, ChitGTU Publ., 1996, 139 p.
13. Prezentatsiya investproekta “Inkurskoe i Kholtosonskoe mestorozhdenia vol'framovykh rud”, GK “Akropol” [Presentation of the investment project “Inkurskoye and Holtosonskoye deposits of tungsten ores”, Acropolis Group of Companies], available at: nedradv.ru/nedradv/invetsp?obj=4f4588000fe129836fce938f3019c877. (Access: 26.01.2024).
14. Tel'nov A. E. Barun-Narynskoe tekhnogennoe mestorozhdenie vol'frama (Respublika Buryatiya, Zakamenskii raion) [Barun-Naryn technogenic tungsten deposit (Republic of Buryatia, Zakamensky district)], *Novoe v poznanii protsessov rudoobrazovaniya: sbornik materialov Odinnadtsatoi Rossiiskoi molodezhnoi nauchno-prakticheskoi Shkoly* [New in the knowledge of ore formation processes: collection of materials of the Eleventh Russian Youth Scientific and Practical School], Moscow, 28 November – 2 December 2022, IGEM RAN Publ., 2022.
15. Tishkov A. G. Ekologiya ekonomicheski vygodna [Ecology economically profitable], *Prirodouresnyye vedomosti* [Natural resource statements], 2004, No 21–22 (230–231), pp. 2–3. (In Russ.).
16. Trofimov V. T., Ziling D. G., Baraboshkina T. A., Zhigalin A. D., Khar'kina M. A. Transformatsiya ekologicheskikh funktsii litosfery v epokhu tekhnogeneza [Transformation of ecological functions of the lithosphere in the era of technogenesis], Moscow, Noosfera Publ., 2006, 720 p.
17. Fedotov P. K., Petukhov V. I., Fedotov K. V., Burdonov A. E. Analiz napravlenii pererabotki lezhal'nykh khvostov Dzhidinskogo VMK [Analysis of the directions of processing stale tailings of the Dzhidinsky VMK], *Obogashchenie rud* [Ore enrichment], 2016, No 1 (361), pp. 40–46. (In Russ.).

Самсонов Алексей Андреевич (samsonov@geol.msu.ru)

кандидат геол.-минерал. наук, старший научный сотрудник

Бурмистров Алексей Алексеевич

кандидат геол.-минерал. наук, доцент

Тельнов Афанасий Евгеньевич

магистрант

Московский государственный университет им. М. В. Ломоносова, г. Москва, Россия